



**Facultad de Informática  
Universidad Nacional de La Plata**

## **Trabajo Final Integrador**

**Alumno: Daniel Marcelo Argüello**  
**([darguell@frm.utn.edu.ar](mailto:darguell@frm.utn.edu.ar))**

**Especialización en Interconexión de Redes y Servicios**

**Director: Luis Marrone**  
**Co-Director: Santiago Pérez**

**Título: “Gigabit Wi-Fi: Visión general y desafíos técnicos”**

**Septiembre de 2016**



## RESUMEN

En la actualidad, nos encontramos comunicados de manera inalámbrica mediante una infinidad de dispositivos portátiles como teléfonos móviles, impresoras, electrodomésticos, desde las consolas de juego hasta las cámaras digitales. Cada vez existen más dispositivos que se comunican sin la necesidad de cables, y nos permiten navegar en Internet desde cualquier parte.

Todo este proceso de comunicación está basado en un protocolo estándar desarrollado para las redes inalámbricas, denominado 802.11, que es comercializado con el nombre de Wi-Fi.

Wi-Fi es una marca de la Wi-Fi Alliance, una organización comercial de fabricantes de hardware y software (fue fundada por 3Com, Cisco, Intersil, Agere, Nokia y Symbol en Agosto de 1999, con el compromiso de impulsar el desarrollo a nivel mundial de la tecnología de LAN inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.11) cuyo objetivo es promover el uso de la tecnología 802.11 y velar por su interoperabilidad.

A medida que evolucionan las aplicaciones y crecen las necesidades de ancho de banda y cobertura, surgen nuevos tipos de conexión y aumentan cada vez más las velocidades de transmisión, ofreciendo una mayor calidad de conexión al consumidor.

La penetración creciente de Wi-Fi está ayudando a extender la tecnología más allá de la de PC y en aplicaciones de electrónica de consumo, como la telefonía por Internet, la música, juegos y visualización de fotos e incluso en la transmisión de vídeo en casa.

Las tecnologías móviles también han demostrado madurez en las grandes empresas, para facultar a los trabajadores y aumentar la productividad, al aumentar enormemente el acceso a herramientas e información. Estos nuevos usos, así como el creciente número de usuarios de LAN inalámbrica convencional, hacen necesario mejorar las características de transmisión en redes Wi-Fi.

De acuerdo con ello, IEEE 802.11, el comité responsable de los estándares LAN inalámbricos, recientemente introdujo dos nuevos estándares: 802.11ac y 802.11ad, que establecen redes Wi-Fi que operan por encima de 1 Gbps.

El propósito de este descriptivo es presentar los principios de funcionamiento y las mejoras y novedades introducidas en los estándares IEEE 802.11ac y IEEE 802.11ad, para comprender las nuevas características tecnológicas que les permiten entregar hasta diez veces el rendimiento de procesamiento y de velocidad de datos comparado con las tecnologías de Wi-Fi de la anterior generación.



---

## CONTENIDOS

---

<b>I) INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>I.1 Breve reseña histórica .....</b>	<b>7</b>
<b>I.2 Hacia los Gigabit Wi-Fi .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3 Visión General de las tecnologías más importantes .....</b>	<b>9</b>
I.3.1 Antenas MIMO .....	12
I.3.2 OFDM, OFDMA y SC-FDMA.....	12
I.3.3 Modulación de amplitud en cuadratura .....	18
<b>II) IEEE 802.11ac.....</b>	<b>21</b>
<b>II.1 Visión General .....</b>	<b>21</b>
II.1.1 Más flujos de datos espaciales .....	23
II.1.2 MIMO multiusuario (MU-MIMO) .....	23
II.1.3 Modulación y codificación .....	24
II.1.4 Otros elementos o características .....	24
<b>II.2 Mejoras de capa PHY .....</b>	<b>25</b>
II.2.1 Mejoras PHY, la formación de haz y más.....	25
II.2.2 Ancho de canal.....	25
II.2.3 Más flujos espaciales .....	26
II.2.4 Beamforming e información del estado del canal .....	27
II.2.5 Tramas de sondeo en 802.11ac .....	29
<b>II.3 Mejoras de capa MAC.....</b>	<b>32</b>
II.3.1 MIMO multiusuario, modulación y mejoras en la MAC .....	32
II.3.1.1 MIMO multiusuario .....	32
II.3.2 Los algoritmos de pre codificación para el beamforming y el DL MU-MIMO....	35
II.3.3 Programación DL MU-MIMO oportunidades de transmisión múltiple .....	36
<b>II.4 Cambios en la MAC.....</b>	<b>37</b>
II.4.1 Agregación de tramas, A-MPDU, A-MSDU .....	37
II.4.2 El cifrado y la opción GCMP .....	39
II.4.3 Mejoras en el ahorro de energía .....	40
II.4.4 Servicio básico extendido del factor de carga establecida.....	41
II.4.5 La coexistencia y compatibilidad con versiones anteriores .....	41
II.4.6 Protección, ancho de banda dinámico y canalización .....	43

<b>III) IEEE 802.11ad .....</b>	<b>47</b>
<b>III.1 Introducción .....</b>	<b>47</b>
III.1.1 Comunicación Direccional .....	48
III.1.2 IEEE 802.11ad clases de dispositivos y casos de uso .....	49
<b>III.2 Suposiciones del diseño IEEE 802.11ad .....</b>	<b>50</b>
<b>III.3 Capa Física de IEEE 802.11ad.....</b>	<b>51</b>
<b>III.4 Arquitectura de red IEEE 802.11ad.....</b>	<b>53</b>
III.4.1 Intervalo Beacon (BI) .....	53
III.4.2 Conjuntos de servicios básicos personal .....	55
III.4.3 Anuncios de red y de planificación .....	55
<b>III.5 Capa de control de acceso al medio IEEE 802.11AD.....</b>	<b>56</b>
III.5.1 Acceso basado en contención al medio .....	57
III.5.2 Asignación de tiempo de canal dinámico .....	57
III.5.3 Asignación pseudo-estática de tiempo de canal TDMA .....	59
<b>III.6 Concepto de Beamforming de IEEE 802.11AD .....</b>	<b>60</b>
III.6.1 SLS- Fase de barrido a nivel de sector .....	62
III.6.2 BRP- Fase protocolar de refinamiento de haz .....	62
<b>III.7 Protocolo de beamforming IEEE 802.11AD.....</b>	<b>64</b>
III.7.1 Entrenamiento beamforming de asociación .....	64
III.7.2 Formación del haz en el intervalo de transmisión de información .....	66
<b>III.8 Consideraciones finales .....</b>	<b>67</b>
<b>IV) Conclusiones .....</b>	<b>69</b>
<b>V) Referencias .....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>I) INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
IPJ Journal CISCO 17.1 2014 – Gigabit Wi-Fi – William Stalling	
Figura 1 Sistema MIMO .....	10
Figura 2 Sistema MIMO 3x4.....	11
Figura 3 OFDM .....	13
Figura 4 Ortogonalidad de OFDM.....	15
Figura 5 OFDM y OFDMA.....	16
Figura 6 Ejemplo de OFDMA y SC-FDMA.....	17
Figura 7 Constelación de señal para Modulación 16-QAM .....	19
<b>II) IEEE 802.11ac.....</b>	<b>21</b>
WHITE PAPER – ARUBA Networks – 802.11 AC IN-DETH	
Figura 8 Sub-portadoras utilizadas en 802.11 a, n y ac .....	27
Figura 9 Realimentaciones para beamforming.....	28
Figura 10 Beamforming de usuario único.....	29
Figura 11 Beamforming de usuario múltiple .....	30
Figura 12 Matriz V comprimida .....	31
Figura 13 Secuencia de tramas MIMO.....	33
Figura 14 Ejemplo de transmisiones MIMO .....	34
Figura 15 Ejemplo de transmisiones MIMO no permitidas.....	34
Figura 16 Interferencias MIMO multiusuario .....	35
Figura 17 Selección de la trama-usuario y pre-codificación .....	37
Figura 18 Trama MAC agregada en 802.11ac.....	38
Figura 19 Formato del preámbulo VTH .....	42
Figura 20 Ancho de banda dinámico para un canal de 80 Mhz .....	44
Figura 21 Canales primarios y secundarios .....	45
Figura 22 Coexistencia de varias redes en una misma frecuencia .....	45
<b>III) IEEE 802.11ad .....</b>	<b>47</b>
IEEE 802.11 ad: Directional 60 GHz Communication for Multi-Gbps WI-Fi	
Figura 23 Sectores de antenas virtuales .....	49
Figura 24 Estructura de paquetes IEEE 802.11ad .....	52
Figura 25 Estructura de intervalo de baliza IEEE 802.11ad .....	54
Figura 26 Asignación dinámica de canales .....	59
Figura 27 Barrido sectorial de nivel .....	61
Figura 28 Formación del sector d transmisión y recepción.....	61
Figura 29 Transacciones de refinamiento de haz .....	64
Figura 30 Entrenamiento de beamforming de asociación .....	65
Figura 31 Estándares IEE 802.11.....	69

---

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1 Estándares de la capa física.....	9
Tabla 2 Características principales y opcionales de la 802.11ac .....	25
Tabla 3 Configuración típica de dispositivos .....	50



# I) Introducción

## I.1 Breve reseña histórica

En la década de 1980, los radioaficionados construyeron los Controladores de Nodo Terminal o TNCs (Terminal Node Controllers) con el fin de poder comunicar sus computadoras a través de equipos de radio de radioaficionados dentro de Norte América. La Asociación de Transmisión de Radio Americana (ARRL, American Radio Relay League) y la Asociación de Transmisión de Radio Canadiense (CRRL, Canadian Radio Relay League) comenzaron a patrocinar las Conferencias de Redes de Computadoras desde inicios de 1980 para proveer un foro para el desarrollo de redes inalámbricas.

En 1985, la FCC (Federal Communications Commission, de EEUU) permitió el uso público de las bandas ISM (entre 902 MHz y 5.85 GHz), lo que resultó ser algo muy atractivo para los vendedores de redes inalámbricas.

A finales de 1980, el Grupo de Trabajo 802 del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) comenzó a trabajar en la estandarización de las redes inalámbricas que utilizaran las bandas ISM de 2.4 GHz y 5.7 GHz.

El Grupo de Trabajo del IEEE 802.11 desarrolló la especificación para el Control de Acceso al Medio (MAC) y la capa Física (PHY) en las redes inalámbricas. El consejo de estándares del IEEE aprobó el estándar el 26 de junio de 1997, el cual fue publicado por el IEEE el 18 de noviembre de 1997.

En diciembre de 1999, la IEEE liberó los suplementos (802.11a y 802.11b) para el estándar IEEE 802.11, en orden para incrementar la velocidad de la capa Física (hasta 11 Mbps en el 2.4 GHz de la banda ISM y hasta 54 Mbps en el 5.7 GHz).

El estándar inicial publicado en 1997 definió una red LAN inalámbrica que podía operar a 1 Mbps o 2 Mbps mediante saltos entre frecuencias y también se podía extender la señal a lo largo del espectro permitido. También define el protocolo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones) como método de acceso al medio.

En 1999, un grupo de empresas se reunieron para crear la WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance). El objetivo de la misma fue designar una marca que permitiese fomentar más fácilmente la tecnología inalámbrica y asegurar la compatibilidad de equipos.

La revisión 802.11b del estándar original fue ratificada ese mismo año. Tiene una velocidad máxima de transmisión de 11 Mbps y utiliza el mismo método de acceso definido en el estándar original (CSMA/CA). El estándar 802.11b funciona en la banda de 2.4 GHz.

Luego, se aprobó el 802.11a, también en 1999. El estándar utiliza el mismo juego de protocolos base que el estándar original, opera en la banda de 5 GHz y utiliza un esquema de modulación distinto llamado OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Multiplexión por División de Frecuencias Ortogonales) con una velocidad máxima de 54 Mbps.

Se puede pensar que el 802.11a debía salir antes que el 802.11b, pero en este caso no fue así. Aunque el grupo 802.11a se estableció primero, el estándar 802.11b se aprobó antes y su producto llegó al mercado mucho antes de los productos 802.11a, en parte debido a la dificultad de operar en la banda más alta de 5 GHz.

Desde abril de 2000, WECA (ahora denominada Wi-Fi Alliance) certifica la interoperabilidad de equipos según la norma 802.11b, bajo la marca Wi-Fi. De ahí, es que se volvió el nombre más utilizado en la jerga computacional para hacer referencia al estándar de redes inalámbricas.

En junio de 2003, se ratificó un tercer estándar de modulación: 802.11g, que es la evolución de 802.11b. Buena parte del proceso de diseño del nuevo estándar consistió en lograr compatibilidad con el estándar 802.11b. El estándar 802.11g utiliza la banda de 2.4 GHz (al igual que 802.11b), pero opera a una velocidad teórica máxima de 54 Mbps. Utiliza también la tecnología OFDM. Este esquema mejorado logró un aumento considerable en la transmisión si bien las demandas son mayores.

En enero de 2004, la IEEE anunció la formación de un nuevo grupo de trabajo 802.11 para desarrollar una nueva versión del estándar 802.11. Finalmente, en setiembre de 2009 el estándar 802.11n fue ratificado con un límite teórico de 600 Mbps. A diferencia de las otras versiones de Wi-Fi, 802.11n puede trabajar en dos bandas de frecuencias: 2.4 GHz (la que emplean 802.11b y 802.11g) y 5 GHz (la que usa 802.11a). Gracias a ello, 802.11n es compatible con dispositivos basados en todas las ediciones anteriores. Además, es útil que trabaje en la banda de 5 GHz, ya que está menos congestionada y en 802.11n permite alcanzar un mayor rendimiento.

## **1.2 Hacia los Gigabit Wi-Fi**

En quince años, las redes LANs inalámbricas han evolucionado desde un interesante proyecto a una tecnología casi indispensable para millones de usuarios, y continúa en permanente avance. La última generación de soluciones WLAN, basadas en los estándares 802.11ac y 802.11ad de la IEEE se proponen el incremento sustancial en las velocidades, para alcanzar el orden de los Gigabit (Tabla 1). Estas últimas tecnologías establecen características PHY y MAC obligatorias y opcionales.

La evolución de Wi-Fi de la gama Mbps a los Gbps, requiere la combinación de algunas de las siguientes tecnologías:

- Generalización MIMO (Multiple Input, Multiple-Output),
- Antenas ortogonales,
- OFDM (Frequency-Division Multiplexing),

- QAM (Quadrature Amplitude Modulation, Modulación de Amplitud en Cuadratura),
- Las técnicas de agregación MAC,
- Diferente número de streams espaciales y de ancho de banda de canal,
- Cambio de banda de frecuencias.

<i>Estándar</i>	<b>802.11a</b>	<b>802.11b</b>	<b>802.11g</b>	<b>802.11n</b>	<b>802.11ac</b>	<b>802.11ad</b>
<b>Año</b>	1999	1999	2003	2009	2012	2014
<b>Velocidad</b>	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	65 to 600 Mbps	78 Mbps to 3.2 Gbps	6.76 Gbps
<b>Frecuencia</b>	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 o 5 GHz	5 GHz	60 GHz
<b>AB</b>	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20, 40 MHz	40, 80, 160 MHz	2160 MHz
<b>Antena</b>	1 × 1 SISO	1 × 1 SISO	1 × 1 SISO	Up to 4 × 4 MIMO	Up to 8 × 8 MIMO, MU-MIMO	1 × 1 SISO

**Tabla 1 - Estándares de la capa física**

## **I.3 Visión General de las tecnologías más importantes**

### **I.3.1 Antenas MIMO**

En la comunicación tradicional de dos vías entre dos estaciones inalámbricas, cada estación emplea una única antena para la transmisión y recepción, y se la conoce como comunicación SISO (Single Input Single Output - entrada única, salida única). A velocidades más altas existen impedimentos para lograr prestaciones confiables. Se debe considerar:

- El ruido
- Los efectos de trayectos múltiples.

Este último punto se refiere al hecho de que una señal puede llegar a una antena de destino no sólo por un camino directo, sino por una o más rutas que implican una reflexión entre la fuente y destino.

Estos caminos múltiples interfieren entre sí y hacen la recuperación de los datos de la señal más difícil. Una solución es usar múltiples antenas, ya sea en el extremo transmisor o el extremo de recepción, o ambos.

En un esquema de MIMO, el transmisor y el receptor emplean múltiples antenas. El flujo de datos fuente se divide en  $n$  sub-flujos, uno para cada una de las  $n$  antenas transmisoras.

En el extremo receptor,  $m$  antenas reciben las transmisiones de la fuente de  $n$  antenas a través de una combinación de múltiples transmisiones y trayectos por la reflexión (Figuras 1 y 2). Las señales de salida de todas las antenas de recepción ( $m$  múltiples salidas) se combinan.

Mediante complejos algoritmos matemáticos es posible mejorar la recepción de la que se puede lograr con un único canal.

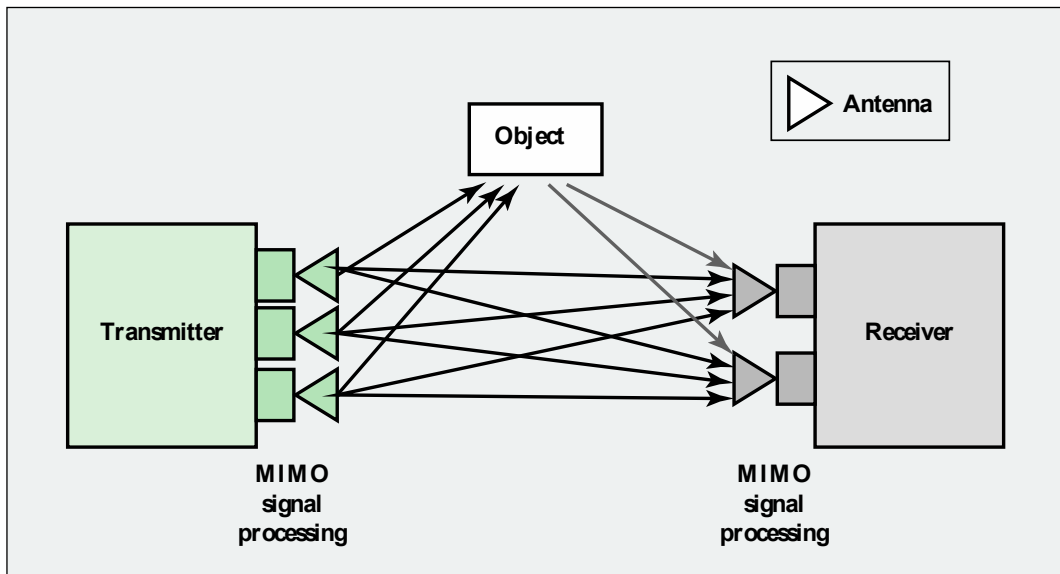


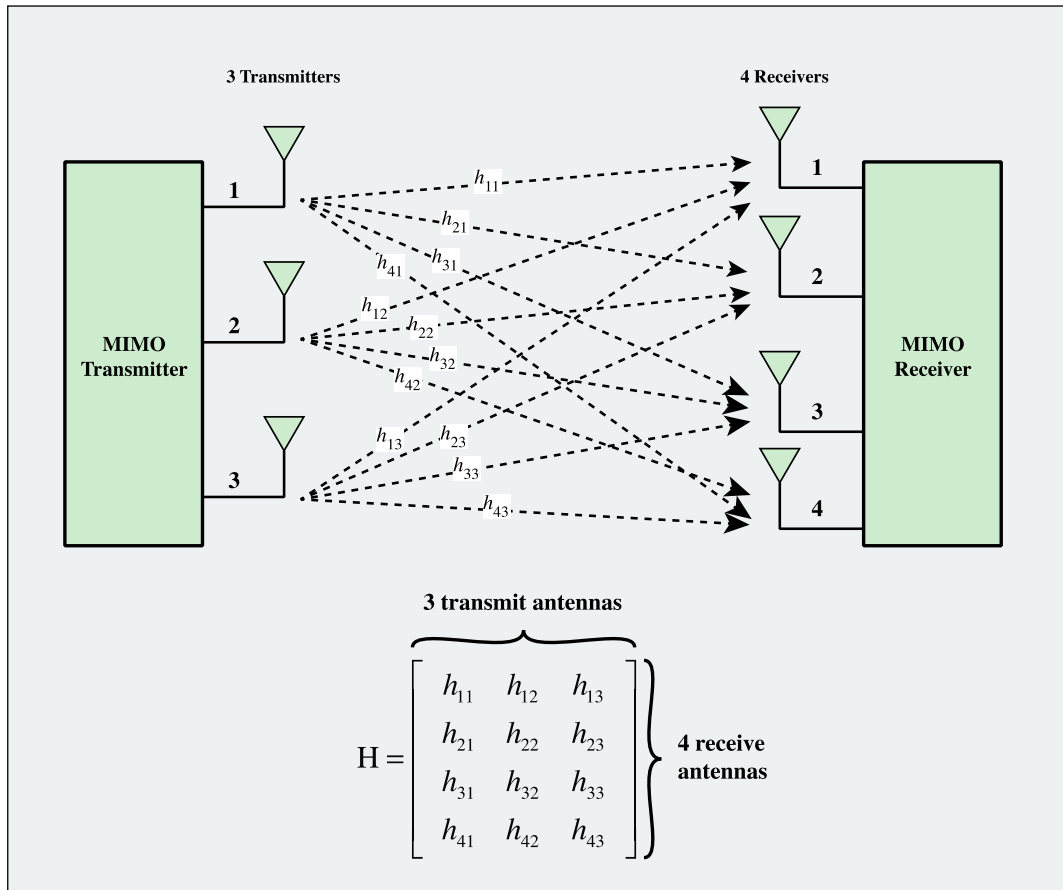
Figura 1 - Sistema MIMO

Así, un sistema MIMO  $3 \times 4$  tiene 3 antenas en un extremo del canal y 4 en el otro extremo. En configuraciones con una estación base, como una red celular o una red Wi-Fi como AP (Access Point – AP), el primer número se refiere típicamente al número de antenas en la estación base.

Hay dos tipos de transmisión MIMO:

- La diversidad espacial: Los mismos datos se codifican y se transmiten a través de múltiples antenas. Existe un aumento efectivo de la potencia en el canal que es proporcional al número de antenas de transmisión. Este proceso mejora la SNR (Signal-to-noise ratio - relación señal-ruido). Además, los diversos desvanecimientos provocados por trayectos múltiples ofrecen múltiples "puntos de vista" en el receptor de los datos transmitidos, lo que aumenta la robustez (posibilidad de recuperar la transmisión original). En un escenario de trayectos múltiples, donde cada antena de recepción haría experimentar un entorno de interferencia diferente, existe una alta probabilidad de que, si una antena está sufriendo un alto nivel de degradación, otra antena tendrá suficiente nivel de señal.
- La multiplexación espacial: Un flujo de datos fuente se divide entre las antenas de transmisión. El aumento de la capacidad del canal es proporcional al número disponible de antenas en el transmisor o en el receptor, la que sea menor. La multiplexación espacial se puede utilizar cuando las condiciones de transmisión son favorables y de relativamente cortas distancias en comparación con la diversidad espacial. Para recuperar los flujos de datos individuales, el receptor debe realizar un considerable procesamiento de

señales para obtener los sub-flujos entrantes, todos los cuales se están transmitiendo en el mismo canal de frecuencia.



**Figura 2 - Sistema MIMO 3x4**

En MU-MIMO (Múltiple-Usuario MIMO), se extiende el concepto básico MIMO a múltiples puntos finales, cada uno con múltiples antenas. La ventaja de MU-MIMO en comparación con un solo usuario (MIMO) es que la capacidad disponible puede ser compartida para satisfacer demandas que varían en el tiempo. Estas técnicas MU-MIMO, se utilizan tanto en Wi-Fi y redes celulares 4G.

MU-MIMO tiene dos aplicaciones:

- Uplink-Multiple Access (MAC): Múltiples usuarios finales transmiten simultáneamente a una sola estación base.
- Downlink-Broadcast Channel (BC): La estación base transmite flujos de datos por separado a múltiples usuarios independientes.

En MIMO-MAC se utiliza el canal de enlace ascendente para proporcionar múltiples accesos a las estaciones de abonado. En general, los sistemas generales MIMO-MAC

superan punto-a-punto a MIMO, particularmente si el número de antenas del receptor es mayor que el número de antenas de transmisión a cada usuario. Una variedad de técnicas de detección multiusuario se utiliza para separar las señales transmitidas por los usuarios.

En MIMO-BC se utiliza en el canal de enlace descendente para permitir a la estación base transmitir diferentes flujos de datos a múltiples usuarios a través de la misma banda de frecuencia. MIMO-BC es más difícil de implementar. Las técnicas empleadas implican el procesamiento de datos en el transmisor para minimizar la interferencia inter-usuario.

### **I.3.2 OFDM, OFDMA y SC-FDMA**

Todas las tecnologías tratadas derivan de una de las técnicas más antiguas utilizadas en las comunicaciones: FDM (Frecuencia-Division-Multiplexing – Multiplexación por División de Frecuencia).

FDM significa la división de la transmisión en múltiples canales, a través de la división de la banda de frecuencia transmitida mediante la implementación de bandas más estrechas, cada una de las cuales se utiliza para constituir un canal distinto. Los ejemplos más comunes de FDM son la televisión por cable, la transmisión de radio y la televisión.

Una aplicación común de FDM es la FDMA (Frequency-Division Multiple Access – Acceso Múltiple por División de Frecuencia), que es una técnica utilizada para compartir el espectro entre múltiples estaciones. En una configuración típica, una estación base se comunica con numerosas estaciones de abonado.

Tal configuración se encuentra en las redes de satélite, las redes celulares, Wi-Fi y WiMAX. Típicamente, la estación base asigna anchos de banda a las estaciones dentro del ancho de banda total disponible. Las principales características de FDMA incluyen:

- Cada canal está dedicado a una sola estación; no se comparte.
- Si un canal no está en uso, está inactivo y la capacidad se desperdicia.
- Los canales individuales deben estar separados por bandas de protección para minimizar la interferencia.

Por lo tanto, este esquema divide el ancho de banda disponible en múltiples bandas, o canales que no se superponen, como con FDM. Los canales se asignan a través de múltiples estaciones, permitiendo así el acceso múltiple al ancho de banda disponible.

La OFDM (Orthogonal Frequency-Division-Multiplexing – Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal), también llamada modulación multiportadora, es una forma de FDM en el que un solo flujo de datos se transmite sobre el ancho de

banda disponible, enviando algunos de los bits en cada canal. Por lo tanto, con OFDM, todos los canales son dedicados a una sola fuente de datos (Figura 3).

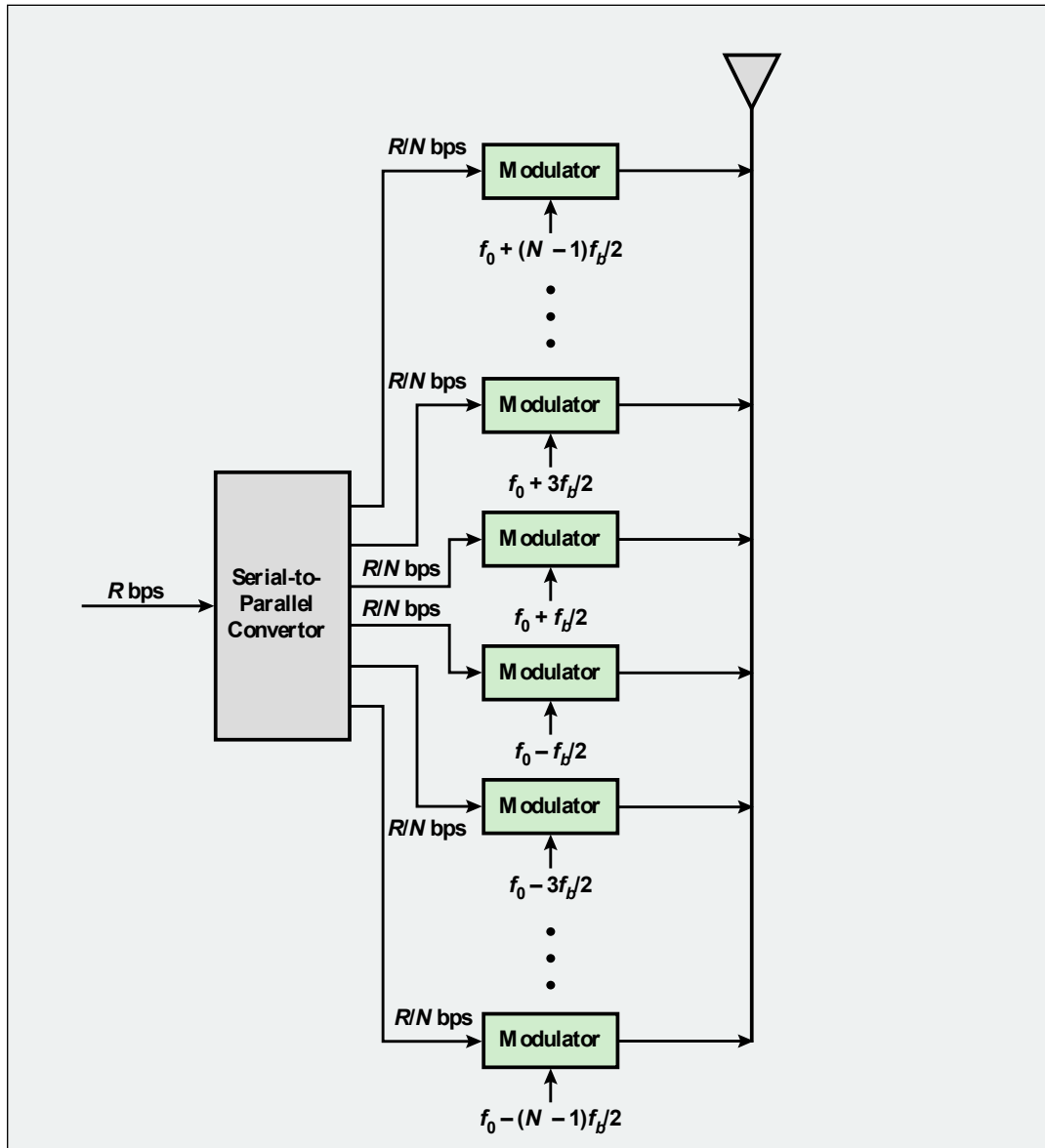


Figura 3 – OFDM

Supongamos que tenemos un flujo de datos que opera a  $R$  bps y el ancho de banda de  $NB$ , centrada en  $f$ . Se podría usar todo el ancho de banda para enviar el flujo de datos, en cuyo caso la duración de cada bit sería  $1/R$ . La alternativa es dividir el flujo de datos en  $N$  flujos parciales, utilizando un conversor de serie a paralelo. Cada sub-flujo tiene una velocidad de datos  $R/N$  bps y se transmite en una sub-portadora separada, con un espaciado entre subportadoras adyacentes de  $B$ . Ahora, la duración del bit es  $N/R$ .

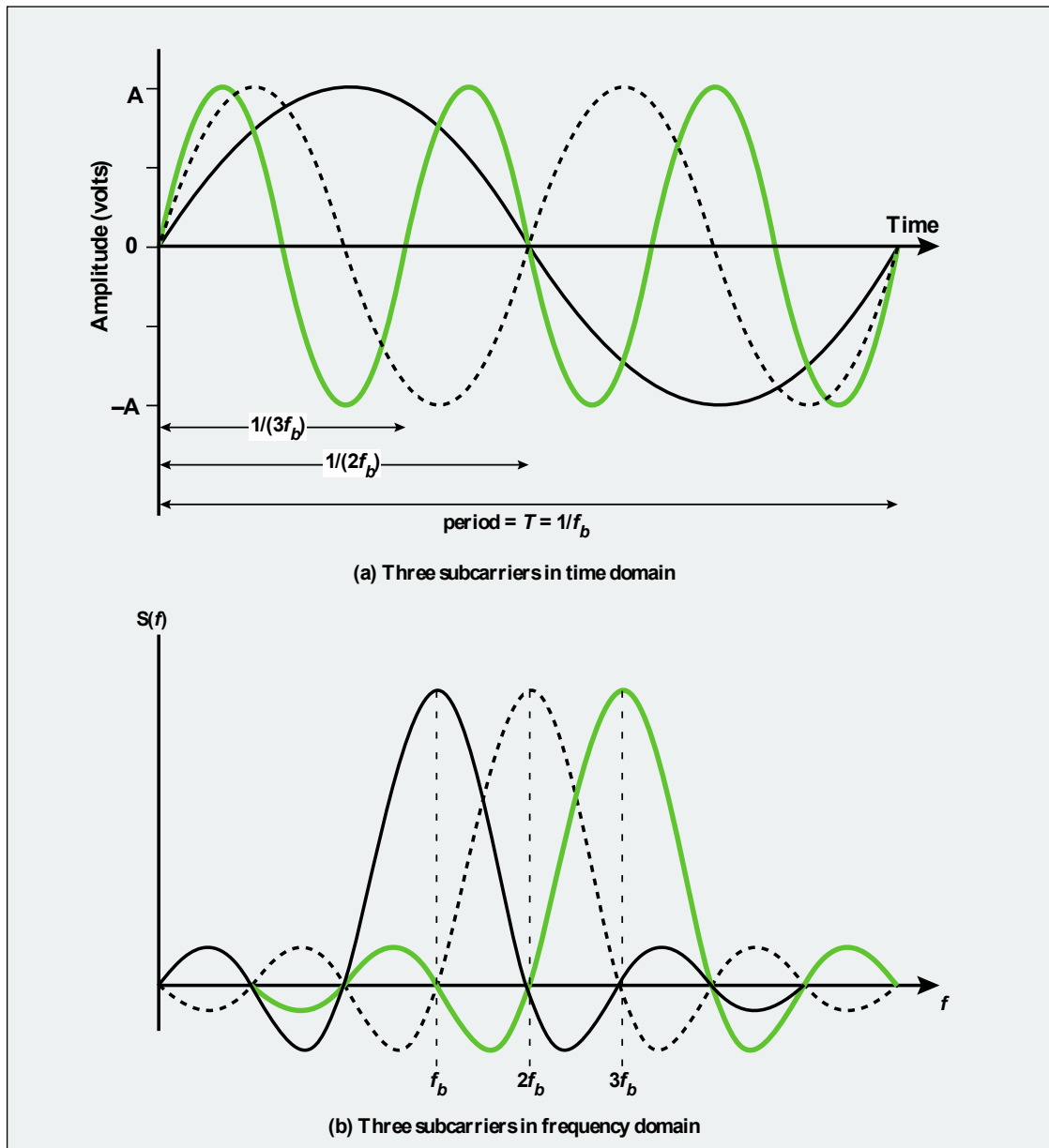
El esquema OFDM utiliza técnicas de procesamiento de señal digital avanzadas para distribuir los datos a través de múltiples portadoras de frecuencias. La relación entre las sub-portadoras se conoce como ortogonalidad. El resultado es que los picos de la densidad de potencia espectral de cada sub-portadora, se producen en un punto en el que la potencia de las otras sub-portadoras es cero (Figura 4). Con OFDM, las sub-portadoras se pueden agrupar juntas porque hay una interferencia mínima entre sub-portadoras adyacentes.

OFDM tiene varias ventajas:

- En primer lugar, el desvanecimiento selectivo de frecuencia afectará sólo a algunas sub-portadoras y no toda la señal. Si los datos están protegidos por un código de corrección de errores hacia adelante, este tipo de degradación se maneja fácilmente.
- OFDM supera la interferencia ISI (intersymbol interference – Interferencia entre símbolos) en un entorno múltiple. ISI tiene un mayor impacto a velocidades de transmisión más altas, ya que la distancia entre los bits, o símbolos, es más pequeño. Con OFDM, la velocidad de datos se reduce en un factor de la  $N$ , aumentando el tiempo en un factor  $N$ . Por lo tanto, si el período de símbolo es  $T$  para el flujo fuente, el período para las señales OFDM es  $NT$ . Este esquema de modulación reduce drásticamente el efecto de la ISI. Como criterio de diseño,  $N$  se elige de manera que  $NT$  sea significativamente mayor que la dispersión del retardo de la raíz cuadrada media del canal.

Una variante de OFDM es Orthogonal Frequency-Division Multiple (OFDMA). Al igual que OFDM, OFDMA emplea múltiples sub-portadoras estrechamente espaciadas, pero las sub-portadoras se dividen en grupos de sub-portadoras. Cada grupo se llama canal secundario. Las sub-portadoras que forman un sub-canal no necesitan ser adyacentes. En el enlace descendente, diferentes sub-canales pueden estar destinados a diferentes receptores. En el enlace ascendente, un transmisor se le puede asignar uno o más sub-canales.





**Figura 4 - Ortogonalidad de OFDM**

Una variante de OFDM es Orthogonal Frequency-Division Multiple (OFDMA). Al igual que OFDM, OFDMA emplea múltiples sub-portadoras estrechamente espaciadas, pero las sub-portadoras se dividen en grupos de sub-portadoras (Figura 5). Cada grupo se llama canal secundario. Las sub-portadoras que forman un sub-canal no necesitan ser adyacentes. En el enlace descendente, diferentes sub-canales pueden estar destinados a diferentes receptores. En el enlace ascendente, un transmisor se le puede asignar uno o más sub-canales.

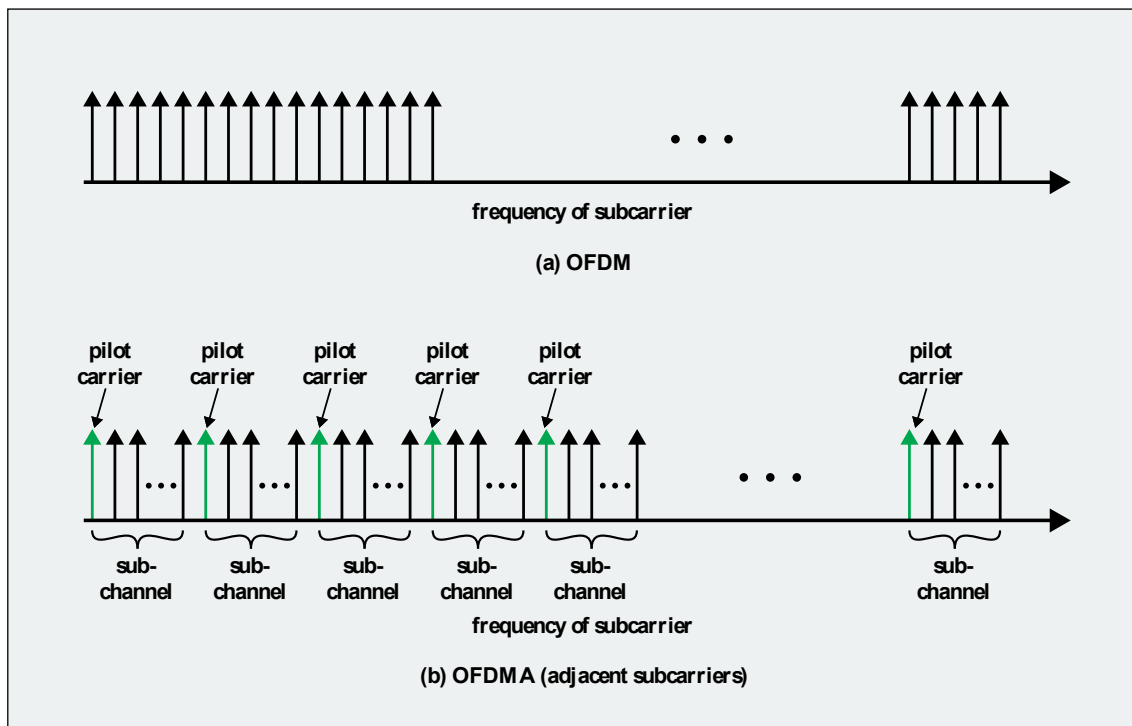


Figura 5 - OFDM y OFDMA

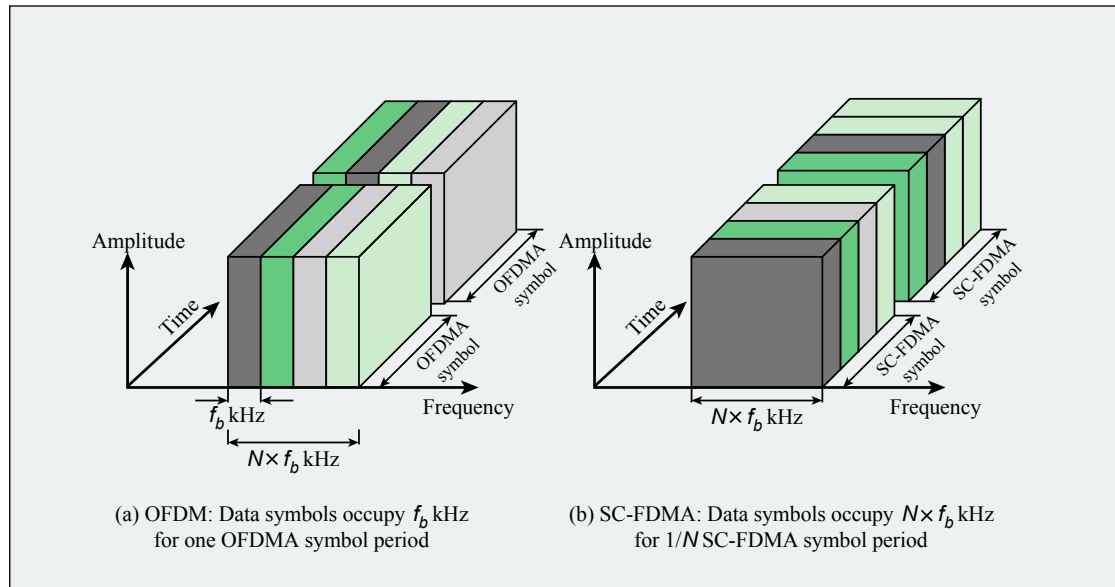
La sub-canalización define sub-canales que se pueden asignar a las estaciones de abonado (SSs) en función de las condiciones de canal y requerimientos de datos. Usando sub-canalización, dentro de una misma Ranura de una Estación Base (BS) se puede asignar más potencia de transmisión al dispositivo de un usuario (SSs) con SNR baja, y menos energía a los dispositivos de usuarios con mayor SNR.

La sub-canalización también permite a las BS asignar mayor potencia a los sub-canales asignados a SSs, resultando en una mejor cobertura en interiores. Los sub-canales se agrupan adicionalmente en ráfagas, que pueden ser asignadas a los usuarios inalámbricos. Cada asignación de ráfaga puede ser cambiada trama a trama, así como en el orden de modulación, permitiendo que la estación base ajuste dinámicamente el ancho de banda de acuerdo a la situación actual del sistema.

La sub-canalización en el enlace ascendente, puede ahorrar potencia de transmisión al dispositivo del usuario, porque puede concentrar la potencia sólo en algún o algunos canales secundarios que le sean asignados. Esta característica de ahorro de energía es particularmente útil para dispositivos que funcionan con baterías.

Otra variante de OFDM es SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access – FDMA de Portadora Única), que es una técnica de acceso múltiple relativamente poco desarrollada, con estructura y rendimiento similares a OFDMA (Figura 6). Una ventaja importante de SC-FDMA sobre OFDMA es la menor PAPR (Peak-to-Average Power Ratio – Tasa de Potencia Pico-Promedio) de la forma de onda

transmitida, lo que beneficia al usuario móvil en términos de duración de la batería y la eficiencia de energía.



**Figura 6 - Ejemplo de OFDMA y SC-FDMA**

En OFDMA las señales tienen una PAPR más alta, ya que, en el dominio del tiempo, un multi-portadora de la señal es la suma de muchas señales de banda estrecha. En algunos momentos, esta suma es grande y en otros momentos pequeña, lo que significa que el valor pico de la señal es sustancialmente mayor que el valor medio.

Por lo dicho, SC-FDMA es superior a OFDMA. Sin embargo, su uso se limita para enlace ascendente debido a que el aumento del procesamiento en el dominio de tiempo de SC-FDMA implicaría una considerable carga para la estación base. SC-FDMA realiza un complejo procesamiento de señal digital, que se propaga a los datos sobre todas las sub-portadoras que llevan información. Esto implica prácticamente la estructura de una sola portadora virtual. Esta estructura a continuación, se pasa a través de los módulos de procesamiento OFDM para dividir la señal en sub-portadoras. Ahora, sin embargo, cada dato se lleva por cada sub-portadora.

Para OFDM, un flujo de datos fuente se divide en  $N$  flujos de datos separados y estos flujos se modulan y transmiten en paralelo en  $N$  sub-portadoras separadas, cada una con un ancho de banda  $B$ . La fuente del flujo de datos tiene una velocidad de  $R$  bps, y la velocidad de datos en cada sub-portadora es  $R / N$  bps.

Para SC-FDMA, parece que el flujo de datos fuente se modula en una única portadora (SC) de ancho de banda  $N \times B$  y se transmite a una velocidad de datos de  $R$  bps. Los datos se transmiten a una velocidad más alta, pero sobre a un ancho de banda mayor en comparación a la velocidad de datos en una única sub-portadora de OFDM.

Sin embargo, debido el complejo procesamiento de señales de SC-FDMA, la descripción precedente no es exacta.

En efecto, el flujo de datos de origen se replica  $N$  veces, y cada copia del flujo de datos es independientemente modulada y transmitida en una sub-portadora, con una velocidad de datos en cada sub-portadora de  $R$  bps. En comparación con OFDM, estamos transmitiendo a una mayor velocidad de datos en cada sub-portadora, pero ya que estamos transmitiendo el mismo flujo de datos en cada sub-portadora, todavía es posible recuperar de forma fiable los datos originales en el receptor.

Una observación final se refiere a la expresión de “acceso múltiple”. Con OFDMA, es posible transmitir simultáneamente, ya sea desde o hacia diferentes usuarios mediante la asignación de las sub-portadoras durante cualquier intervalo de tiempo para múltiples usuarios. Esta transmisión no es posible con SC-FDMA. En cualquier punto dado en el tiempo, todas las sub-portadoras están llevando datos idénticos y, por lo tanto, deben dedicarse a un usuario. Pero con el tiempo, es posible proporcionar acceso múltiple mediante la asignación del ancho de banda para los diferentes usuarios en diferentes momentos.

### **1.3.3 Modulación de amplitud en cuadratura**

Para transmitir datos digitales a través de una señal analógica, como una señal de radio Wi-Fi, se necesita codificar los datos sobre la señal mediante alguna forma de modulación.

El método más sencillo consiste en proporcionar dos diferentes señales a transmitir durante el tiempo de bit; con un elemento de señal se representa un uno binario con otro un cero binario. Así, ASK (Amplitude-shift keying - Modulación por Desplazamiento de Amplitud) implica la transmisión de una señal de frecuencia constante con variación de la amplitud de la señal entre dos valores.

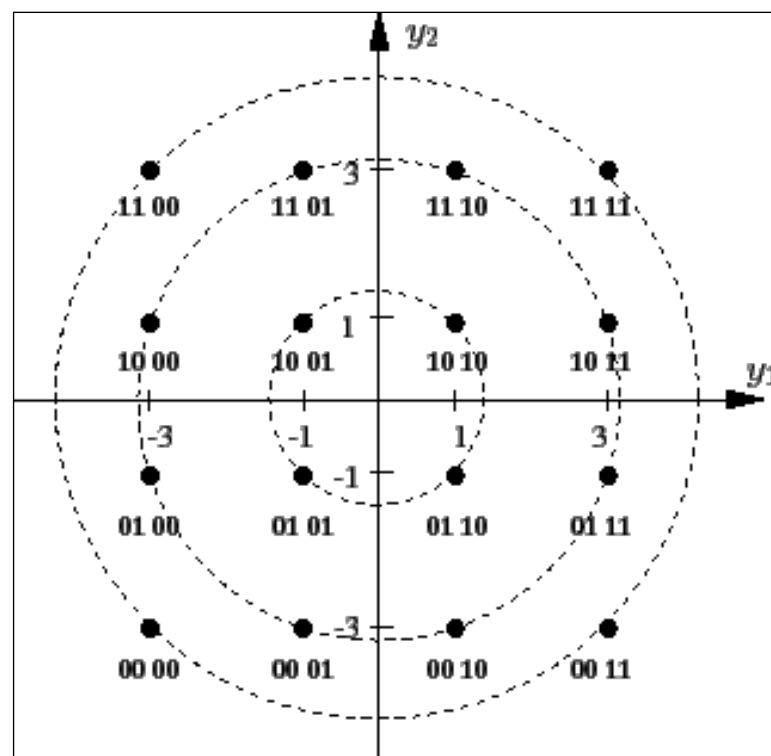
Con PSK (Phase-shift keying – Modulación por Desplazamiento de Fase), se utilizan dos diferentes desplazamientos de fase de la misma frecuencia de la portadora se utilizan para representar los dos dígitos binarios. A medida que la velocidad de datos aumenta, la longitud de cada elemento de señal que representa un solo bit se acorta. Es decir, el elemento de señal es más corto tanto en duración como en longitud física mientras que se transmite.

Por lo tanto, una corta ráfaga de ruido o un impedimento de la transmisión de cualquier tipo, afecta a más bits a medida que aumenta la velocidad de datos. Una forma habitual de hacer frente a este problema es codificar más de un solo bit en cada elemento de señal. Por ejemplo, si se utilizan cuatro amplitudes en lugar de dos, entonces cada elemento de señal puede codificar dos bits. Una de las más eficaces técnicas para la codificación de múltiples bits por elemento de señal es la modulación de amplitud en cuadratura (QAM).

QAM utiliza dos principios básicos para la codificación de datos digitales en una señal analógica: ASK y PSK. QAM se aprovecha del hecho de que es posible enviar dos señales diferentes simultáneamente en la misma frecuencia de portadora, mediante el uso de dos copias de la frecuencia portadora desplazadas  $90^\circ$  entre sí. Para QAM, cada portadora es Modulación ASK.

Las dos señales independientes se transmiten simultáneamente por el mismo medio. En el receptor, las dos señales se demodulan y los resultados se combinan para producir el binario original.

Si se utiliza ASK de dos niveles, cada uno de los dos flujos pueden estar en uno de dos estados y el flujo combinado puede estar en uno de  $4 = 2 \times 2$  estados. Si se utiliza ASK de cuatro niveles (es decir, cuatro diferentes niveles de amplitud), y luego, el flujo combinado puede usarse en uno de  $16 = 4 \times 4$  estados (Figura 7). Esta modulación se conoce como 16-QAM. Se han utilizado sistemas de 64 (64-QAM) e incluso de 256 estados. Es posible un mayor número de estados y velocidad dentro de un ancho de banda dado. Sin embargo, cuanto mayor es el número de estados, mayor será la tasa de error potencial debido al ruido y la atenuación.



**Figura 7 - Constelación de señal para Modulación 16-QAM**



## II) IEEE 802.11ac

### II.1 Visión General

IEEE 802.11ac opera en la banda de 5 GHz, al igual que la mayoría y más lentos estándares 802.11a y 802.11n. Este nuevo estándar utiliza una tecnología avanzada en el diseño de antenas y procesamiento de señales para lograr mayores velocidades de transmisión, a un menor consumo de batería, todo dentro de la misma banda de frecuencia que las versiones anteriores de Wi-Fi.

El nuevo estándar alcanza velocidades de datos mucho más altas que 802.11n:

- Ancho de banda: El ancho de banda máximo de 802.11n es de 40 MHz. El ancho de banda máximo de 802.11ac es de 160 MHz.
- Codificación de la señal: El estándar 802.11n utiliza OFDM con 64 QAM, y 802.11ac utiliza 256 QAM con OFDM. Por lo tanto, se codifican más bits por símbolo. Ambos esquemas utilizan corrección de errores con una tasa de código de 5/6 (bits de datos/ total de bits).
- MIMO: Con 802.11n, el número máximo de antenas es de 4 entradas por canal de entrada y 4 antenas por canal de salida. El 802.11ac estándar aumenta este máximo de  $8 \times 8$ .
- MU-MIMO: El estándar 802.11ac incluye esta opción. Esto significa que en el enlace descendente el transmisor puede utilizar sus recursos de antena para transmitir múltiples tramas a diferentes estaciones, todas al mismo tiempo y en el mismo espectro de frecuencia.

Cada antena de un AP MU-MIMO puede comunicarse simultáneamente con un dispositivo de una sola antena diferente, tal como un teléfono inteligente o tableta, permitiendo a los APs que puedan entregar significativamente más datos en muchos entornos.

La generación de 802.11ac triplica el rendimiento respecto a la 802.11n. Esto es impulsado por una duplicación del ancho de banda de canal de 80 MHz, la adición de una técnica de codificación 256-QAM más eficiente y la transmisión beamforming (formación de haz) explícita para mejorar la calidad de la señal.

Esta reforma define modificaciones estandarizadas sobre la 802.11, tanto en la capa física (PHY) como en la capa de Control de Acceso al Medio (MAC) que permiten a los modos de operación soportar:

- Un rendimiento máximo multi-estación (STA) (medido en el servicio de datos de AP MAC), de al menos 1 Gbps y un rendimiento de enlace único máximo (medido en el servicio de datos de AP MAC), de al menos 500 Mbps.
- La operación de frecuencia de la portadora por debajo de 6 GHz, que excluye la operación de 2,4 GHz al mismo tiempo que garantiza la compatibilidad y la

coexistencia con el legado de dispositivos IEEE 802.11 en la banda sin licencia de 5 GHz.

Está claro que el objetivo es continuar la iniciativa de 802.11n para extender las velocidades y el rendimiento. Para simplificar la tarea, 802.11ac se limita por debajo de 6 GHz, y en la práctica, a 5-6 GHz, ya que sólo se aplica a las bandas de 5 GHz.

Las nuevas tecnologías importantes en 802.11ac deben considerarse como extensiones de las técnicas inalámbricas de capa física iniciadas en 802.11n, en particular el uso de múltiples antenas en el transmisor y el receptor para explotar la característica MIMO para la entrega paralela de múltiples flujos espaciales.

La mayor parte de las características extienden los límites de 802.11n, añadiendo más antenas, más flujos espaciales, canales de RF (Radio frequency – Radio Frecuencia) más anchos y codificación de nivel superior. También se definen nuevos mecanismos, en particular, MU-MIMO, donde un AP (AP) transmite simultáneamente a varios clientes.

Los modelos de uso de redes inalámbricas son particularmente interesantes, ya que muestran Wi-Fi reemplazando el cableado en los dispositivos que durante un tiempo fue el objetivo de la UWB (Ultra-wideband - Ultra Banda Ancha) y que se solapa con el trabajo 802.11ad a 60 GHz. Su intención es reemplazar los cables entre los decodificadores, consolas de videojuegos, ordenadores y monitores de televisión donde el requisito es para muy altas velocidades de datos, pero a distancias relativamente cortas.

Mientras que algunos vendedores de 802.11n ya han hecho incursiones iniciales en este mercado, la mayoría de las empresas de electrónica de consumo ven 802.11ac y 802.11ad como las primeras tecnologías inalámbricas viables para vídeo, especialmente sin comprimir.

Otro escenario es principalmente la transferencia de archivos grandes, donde se desea completar las operaciones rápidamente. Todos los modelos exigen altas tasas de transferencia de datos por períodos prolongados.

Mientras que las aplicaciones residenciales fueron las impulsoras iniciales de la necesidad de desarrollo de 802.11ac, se ha vuelto crítico atender las necesidades de las redes empresariales de hoy en día.

Con 802.11ac se alcanzan nuevas potencialidades:

- Se incrementará el ancho de banda en una celda, lo que permite un único AP al servicio con la misma cantidad de clientes, pero con mayor rendimiento por cliente. A pesar de que el rendimiento 802.11n excede los 100 Mbps por cliente, algunos casos de uso corporativas tales como conexiones de servidor requieren mayor ancho de banda, y 802.11ac cubre este requerimiento al máximo



- Como alternativa, un único AP será capaz de servir a más clientes con el mismo rendimiento. Este suele ser importante en escenarios colmados de clientes, tales como salas de conferencias, donde deben atenderse un gran número de clientes.
- La tendencia hacia más antenas, incluso para pequeños dispositivos, tales como tabletas y teléfonos inteligentes, y la aparición de grandes APs con más de cuatro antenas harán a MIMO la alternativa que mejora la confiabilidad de las conexiones Wi-Fi. Esto hará que sea más fácil proporcionar una cobertura a través de obstrucciones físicas, tales como huecos de ascensores y escaleras.
- Los nuevos modelos de pantalla inalámbrica, mejorarán la comodidad, ya sea permitiendo una conexión rápida a un proyector para presentaciones de diapositivas, la conducción de una pantalla de TV desde un PC o permitiendo una fácil instalación de la señalización digital.

### **II.1.1 Más flujos de datos espaciales**

802.11n define cuatro flujos espaciales, aunque en la actualidad hay pocos APs usando más de tres flujos.

802.11ac mantiene soporte de tres flujos espaciales en los productos actuales, pero permitirá soporte futuro de hasta ocho flujos espaciales.

Los APs crecerán añadiendo antenas, mientras que los clientes se volverán más capaces para implementar múltiples flujos espaciales y beamforming con un número menor de antenas.

Esta divergencia creará oportunidades para multiusuario MIMO, donde un AP de gran capacidad puede comunicarse con múltiples clientes, de menor rendimiento al mismo tiempo. Los productos 802.11ac de hoy en día soportan tres flujos espaciales y se espera que la próxima ola los extienda a cuatro flujos. Aunque no se espera que veamos a los clientes implementar cuatro flujos espaciales (con cuatro antenas), lo más probable es que estos se beneficien cuando se combinan con el soporte futuro de MU-MIMO.

### **II.1.2 MU-MIMO**

Hasta el momento, todas las comunicaciones 802.11 han sido punto-a-punto (uno a uno) o de difusión (de uno a todos). Con 802.11ac, una nueva característica permite a un AP transmitir diferentes flujos de datos a varios clientes objetivos al mismo tiempo.

Esta es una buena manera de hacer uso del excedente esperado de antenas en los APs sobre los clientes, y requiere técnicas beamforming para dirigir la máxima señal a través de los clientes deseados y reducir al mínimo la interferencia causada a otros clientes.

Por ejemplo, si un AP desea utilizar MU-MIMO para los clientes A y B simultáneamente, se configurará el haz para la transmisión de A por lo que presentará un máximo en A, pero un mínimo en B, y viceversa, para la transmisión de B. Hay algunos nuevos términos asociados:

- SDMA (Spatial Division Multiple Access - Acceso Múltiple por División Espacio): Un término para los flujos no separados por frecuencia o tiempo. En su lugar se resolvieron en el espacio como el estilo MIMO de 802.11n.
- DL MU-MIMO (Downlink MU-MIMO): Un modo opcional donde el AP transmite simultáneamente a múltiples dispositivos de recepción.

MU-MIMO no aumenta el desempeño que verán los usuarios, pero permite a la red incrementar su aprovechamiento mediante la transmisión a múltiples clientes simultáneamente en la dirección downstream del AP.

Se espera que MU-MIMO esté disponible como parte de los productos futuros Wave 2 802.11ac; pero la adopción es probable que se retrase debido a la necesidad de nuevos clientes con radios Wave 2 a fin de ver los beneficios de la MU-MIMO o cuatro flujos espaciales que tomará tiempo para que un gran número de clientes estén disponibles y utilizables.

### **II.1.3 Modulación y codificación**

Como los radios hechos con semiconductores se vuelven cada vez más precisos, y el procesamiento digital cada vez más potente, 802.11ac continúa explotando los límites de las técnicas de modulación y de codificación, esta vez con el salto de 64-QAM a 256-QAM.

- 256-QAM, la tasa de 3/4 y 5/6 se añaden como modos opcionales.

Para el caso básico de un flujo de datos espacial en un canal de 20 MHz, esto se extiende a la anterior tasa más alta de 802.11n de 65 Mbps (gran intervalo de guarda) a 78 Mbps y 86,7 Mbps, respectivamente, una mejora del 20% y 33%. Téngase en cuenta que 802.11ac no ofrece todas las opciones de velocidad para cada combinación MIMO.

### **II.1.4 Otros elementos o características**

A continuación, en la Tabla 2, se muestra un resumen de los elementos y características adicionales.

802.11AC MANDATORY AND OPTIONAL FEATURES		
Feature	Mandatory	Optional
Channel width	20, 40, 80 MHz	80+80, 160 MHz
Modulation & coding	MCS 0 – 7 (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 1/2, 2/3, 3/4,5/6)	MCS 8, 9 (256-QAM, 3/4, 5/6)
Spatial streams	1	2 – 8
Guard interval	Long (800 nsec)	Short (400 nsec)
Beamforming feedback		Respond to beamforming sounding
Space-time block coding (STBC)		Transmit and receive STBC
Parity check	Convolutional	Transmit and receive low-density parity check (LDPC)
Multi-user MIMO		Up to 4 spatial streams per client, with same MCS

Tabla 2 - Características principales y opcionales de la 802.11ac

## II.2 Mejoras de capa PHY

### II.2.1 Mejoras PHY, la formación de haz y más

La modificación IEEE 802.11ac se define para las frecuencias por debajo de 6 GHz. En la práctica esto significa que se limita a 5 GHz. La banda de 2,4 GHz no es lo suficientemente amplia como para operación útil. En efecto, 2,4 GHz está específicamente excluida del alcance de la modificación 802.11ac, a pesar de que se requiere compatibilidad hacia atrás con los dispositivos 802.11 más antiguos (802.11a y n) en 5 GHz.

Mientras tanto, el IEEE también está apuntando a la banda de 60GHz (57-63 GHz) con la modificación 802.11ad.

### II.2.2 Ancho de canal

Es una regla fundamental de la comunicación inalámbrica que un espectro más amplio permite un mayor rendimiento, y no es de extrañar que el grupo de tareas 802.11ac ha optado por ampliar el ancho del canal de 40 MHz en 802.11n a 80 y 160 MHz.

Esto permite un aumento proporcional en la velocidad de datos efectiva.

Sin embargo, ya que el espectro asignado para Wi-Fi está limitado, ha sido necesario permitir canales para dividir todo el espectro no contiguo.

Debido a que es difícil encontrar 160 MHz de espectro contiguo, 802.11ac permite dos canales de 80 MHz no contiguos que deben utilizarse juntos como un canal de 160MHz. Por ejemplo, los canales 36-48 y 116-128 comprenden un canal 160MHz

viable, a veces referido como 80 + 80 MHz. Pero cada uno de los canales de 80 MHz subyacentes deben ser contiguos.

Al considerar canales en la banda 5GHz, hay dos restricciones prácticas. Una gran parte de la banda está cubierta por los requisitos reglamentarios para la evasión de radar, para evitar interferencias con los usuarios anteriores de la banda, sobre todo radares militares. La respuesta de la industria a estos requisitos era 802.11h, incluyendo la DFS (Dinamyc Frequency Selection - Selección Dinámica de Frecuencias) y el TPC (Transmit Power Control - Control de Potencia de Transmisión). Este último no se requiere normalmente en los niveles de potencia utilizados por Wi-Fi, pero los equipos que utilizan canales de 5.250 a 5.725 MHz deben estar certificados para DFS.

Con el tiempo, el número de dispositivos que no sean DFS disminuirá y esto se convertirá en una restricción menos importante. La Alianza Wi-Fi tiene un poco de trabajo en marcha con el objetivo de disminuir el número de dispositivos que no sean DFS 5GHz.

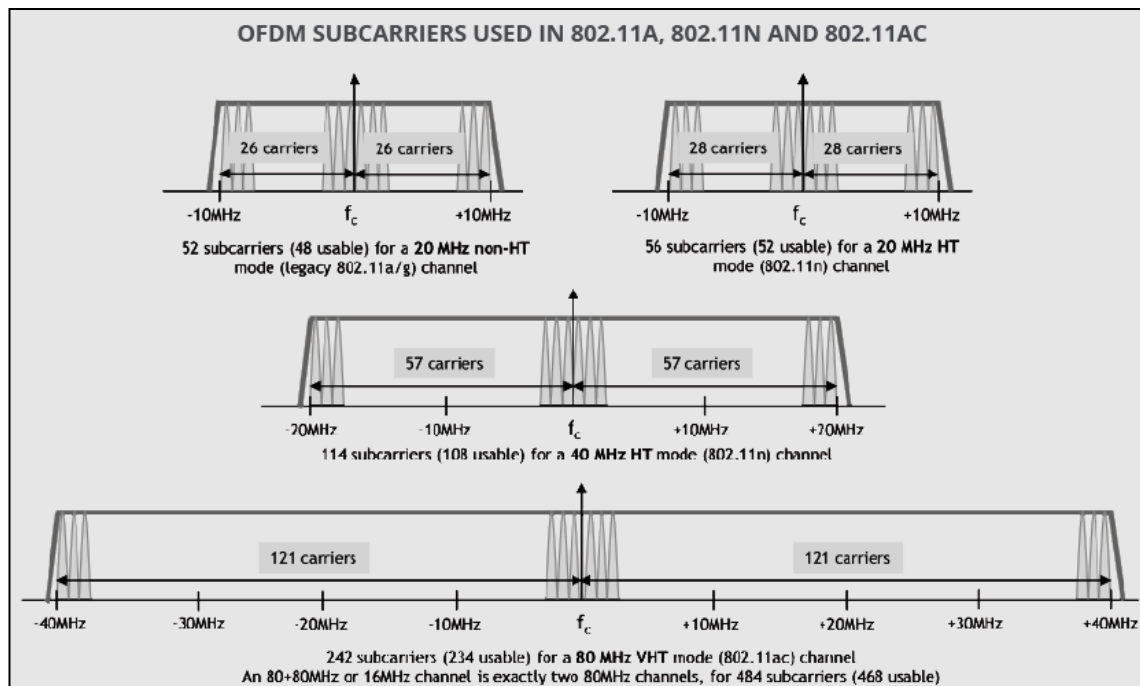
Después de algunos incidentes en los que se muestran enlaces no conformes al aire libre de punto a punto Wi-Fi para interferir con los radares meteorológicos de aeropuertos, la FCC y otros reguladores nacionales ajustan las reglas y definen una banda desde 5600 a 5650 MHz. Esto no está disponible actualmente, incluso para los equipos de DFS.

El diagrama de la Figura 8 muestra que el paso de 20 a 40 y 80 MHz aumenta las subportadoras utilizables por 108/52 (x2.07) y 234/52 (x4.50), respectivamente, sobre el estándar 802.11n de 20 MHz. El canal de 160 MHz siempre se trata como dos canales de 80 MHz para la asignación de subportadora, ya sean contiguos o no.

La Wi-Fi Alliance certificará dispositivos en base a un subconjunto seleccionado de criterios 802.11ac, y aún no se conocen los detalles de ese subconjunto, pero la mejora IEEE actual establece que se requiere capacidad de canal de 80 MHz, mientras que los canales de 160 MHz son opcionales.

### **II.2.3 Más flujos espaciales**

802.11n especifica hasta cuatro flujos espaciales para MIMO, y 802.11ac extiende esto a ocho flujos. La técnica no ha cambiado, pero las matrices para los cálculos se hacen más grandes, al igual que los APs - no pueden haber más corrientes espaciales que el número de antenas de transmisión o recepción (lo que sea menor), por lo que el rendimiento completo 8 SS sólo será posible cuando ambos dispositivos tengan ocho antenas



**Figura 8 – Sub-portadoras utilizadas en 802.11 a, n y ac**

Se necesitarán diseños innovadores de antenas para los dispositivos portátiles, para que los APs, set top boxes y similares utilicen varios flujos. Al igual que con los canales más amplios, al añadir flujos espaciales se aumenta el rendimiento proporcionalmente.

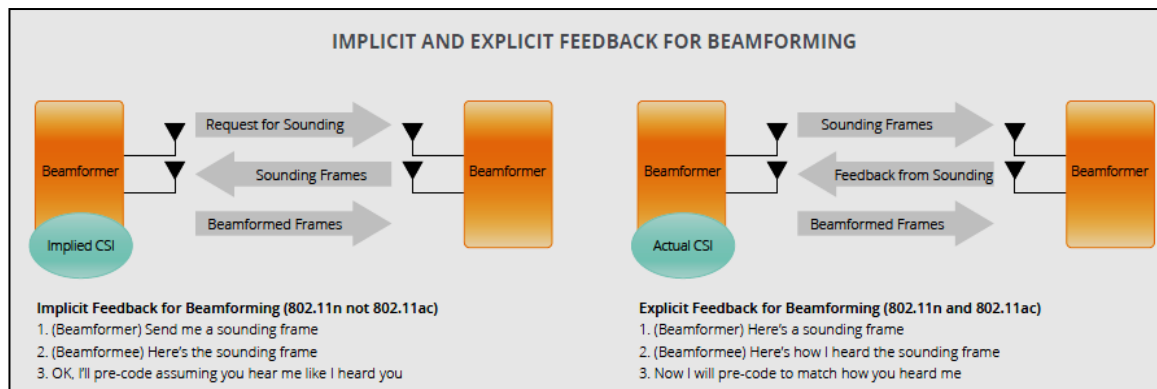
Suponiendo que las condiciones de trayectos múltiples sean favorables, dos flujos ofrecen el doble de rendimiento de un solo flujo, y ocho flujos aumentan el rendimiento a ocho veces.

#### **II.2.4 Beamforming e información del estado del canal**

Las tramas de sondeo se introdujeron en 802.11n para el uso con MIMO y beamforming. El concepto es bastante simple: Un transmisor envía un patrón conocido de símbolos de RF desde cada antena, permitiéndole al receptor construir la matriz de cómo cada antena de recepción escucha cada antena de transmisión.

Esta información se envía de vuelta al transmisor, permitiéndole invertir la matriz y usar los ajustes óptimos de amplitud y fase para una mejor recepción. Con un receptor de antena única, esto resulta en un máximo local por SNR, para el beamforming efectivo (Figura 9).

Las tramas de sondeo son importantes para varias técnicas MIMO, ya que permiten obtener la CSI (Channel State Information - Información del Estado del Canal) en el transmisor.



**Figura 9 - Realimentaciones para beamforming**

La técnica MIMO más importante de 802.11n es la SDM, una técnica en la que el receptor tiene que saber cómo sus antenas receptoras escuchan las distintas señales de transmisión desde el transmisor.

Por ejemplo, si el receptor escucha la antena del transmisor, una señal en 100% de potencia en la antena 1, y al 20% de potencia en la antena 2, se puede restar la señal de 20% en la antena 2 y recuperar otras señales con esa antena.

Esto es relativamente fácil porque cada trama comienza con un preámbulo que aísla las señales de transmisión desde cada antena una por una. Mediante el análisis del LTFs (Long Training Field – Campo de Entrenamiento Largo) de recepción, en el preámbulo de cada trama, el receptor construye un modelo para el estado del canal en ese instante. Se trata de un modelo que se utiliza a continuación para los símbolos subsiguientes en la trama. Los LTF's recibidos proporcionan información del estado del canal en el receptor (CSI-R).

Si el transmisor sabe cómo sus señales se reciben por su objetivo con el suficiente detalle, se puede pre-codificar la señal para cada antena, con el objeto de lograr el mejor rendimiento y la más baja tasa de errores.

En 802.11ac, para esto se utiliza el beamforming, donde se usan múltiples antenas para transmitir una señal a la antena del receptor, y también DL MU-MIMO, donde se configuran transmisiones para dirigir un máximo al cliente deseado, y mínimos a otros clientes.

La CSI en el transmisor es mucho más poderosa que la CSI en el receptor, pero más difícil de lograr. Esto se debe a que debe realimentarse una gran cantidad de información a través del medio inalámbrico, y a que el transmisor y el receptor deben estar de acuerdo en los datos y el formato de dicha retroalimentación.

La matriz completa indicaría amplitud y fase para cada antena de transmisión, para cada antena de recepción, y cada subportadora OFDM en el canal de RF. Se trata de una gran cantidad de datos. Por eso, se han desarrollado varios métodos abreviados

para realimentar una menor cantidad de información, sin comprometer la precisión del beamforming.

802.11n incluye dos métodos para lograr la CSI en el transmisor. Uno es el beamforming implícito que permite al receptor (o beamformee), enviar una trama de sondeo de vuelta al transmisor (beamformer). El beamformer, al recibir la trama de sondeo, procesa la información bajo el supuesto de que el canal de RF es recíproco. Sabiendo cómo transmite la antena la señal de A y se recibe en la antena B, las transmisiones de la antena de B serían recibidas en la antena A de la misma manera.

En este caso, se mide la trayectoria desde la antena de transmisión de B y a la antena de recepción de A. Pero cuando A transmite, su antena de transmisión y la antena de B reciben efectos no deseados que las afectan. Las diferencias de calibración y las no linealidades no se pueden medir. Así, mientras la retroalimentación CSI implícita para el beamforming es relativamente fácil de obtener, no es muy precisa.

En 802.11ac, se descartó la retroalimentación implícita en favor de la retroalimentación explícita. Aquí el beamformer transmite una trama de sondeo y el beamformee analiza cómo se recibe la trama, comprime los resultados a un tamaño razonable y las transmite de nuevo al beamformer. Esto proporciona información precisa del estado del canal, pero requiere un protocolo de coordinación.

## II.2.5 Tramas de sondeo en 802.11ac

802.11n incluye tres opciones para la retroalimentación del beamforming, y los fabricantes no han sido capaces de acordar y aplicar un conjunto común. En la práctica, algunos dispositivos 802.11n actuales configuraran un haz exitosamente cuando ambos extremos de la conexión incluyen conjuntos de chips comunes, pero el beamforming con realimentación explícita no es generalmente una característica de los actuales equipos 802.11n (Figuras 10 y 11).

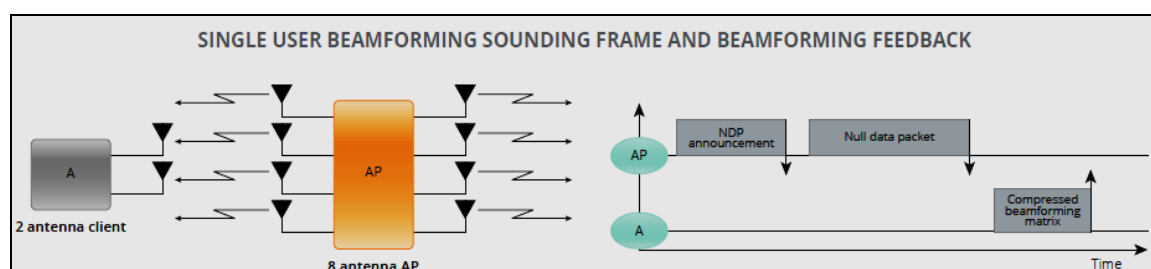
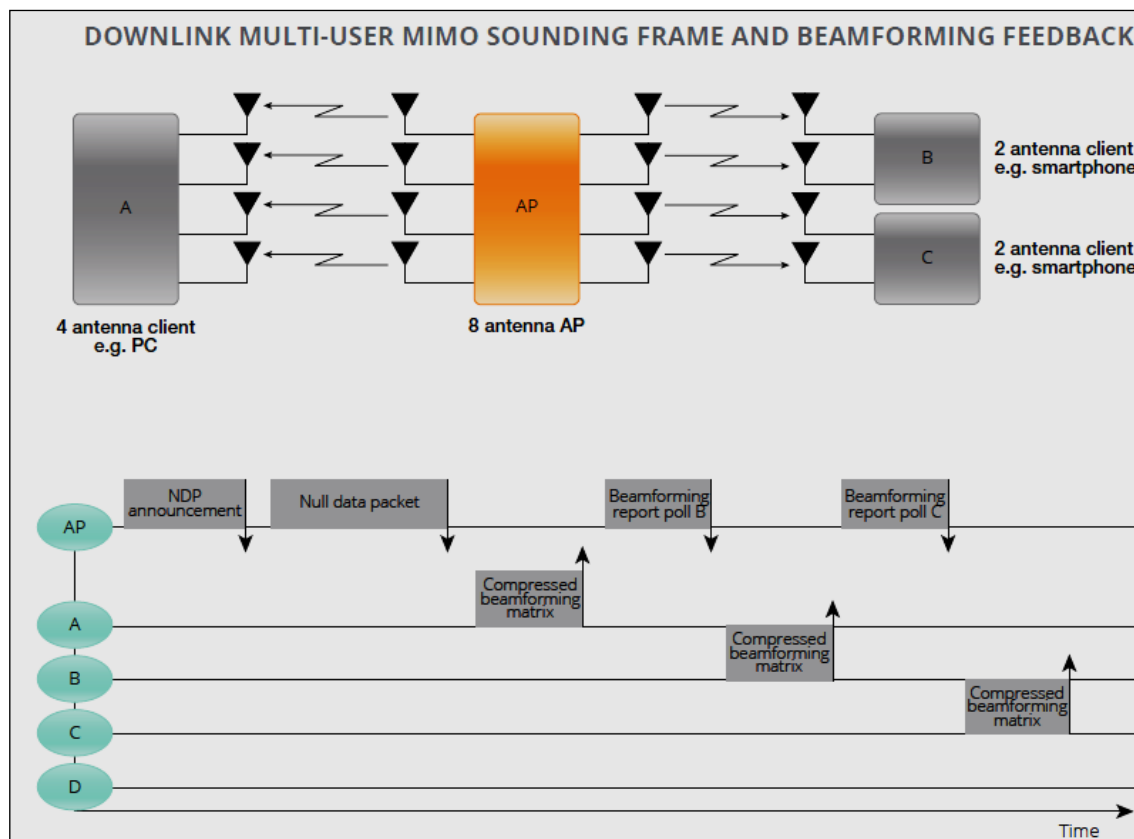


Figura 10 - Beamforming de usuario único



**Figura 11 - Beamforming de usuario múltiple**

Para evitar esta situación, en 802.11ac, sólo se especifica un mecanismo de retroalimentación. Se trata de una retroalimentación explícita usando una matriz comprimida, conocida como la matriz V (Figura 12). La secuencia completa de sondeo comprende un conjunto de tramas de sondeo especiales enviadas por el transmisor (ya sea el beamformer o el AP en el caso de DL MU -MIMO), y un conjunto de tramas de matriz V comprimidas devueltas por el beamformee. Debido a que varios clientes están involucrados en MU-MIMO, un protocolo especial asegura que respondan con tramas de retroalimentación en la secuencia siguiente a la trama de sondeo.

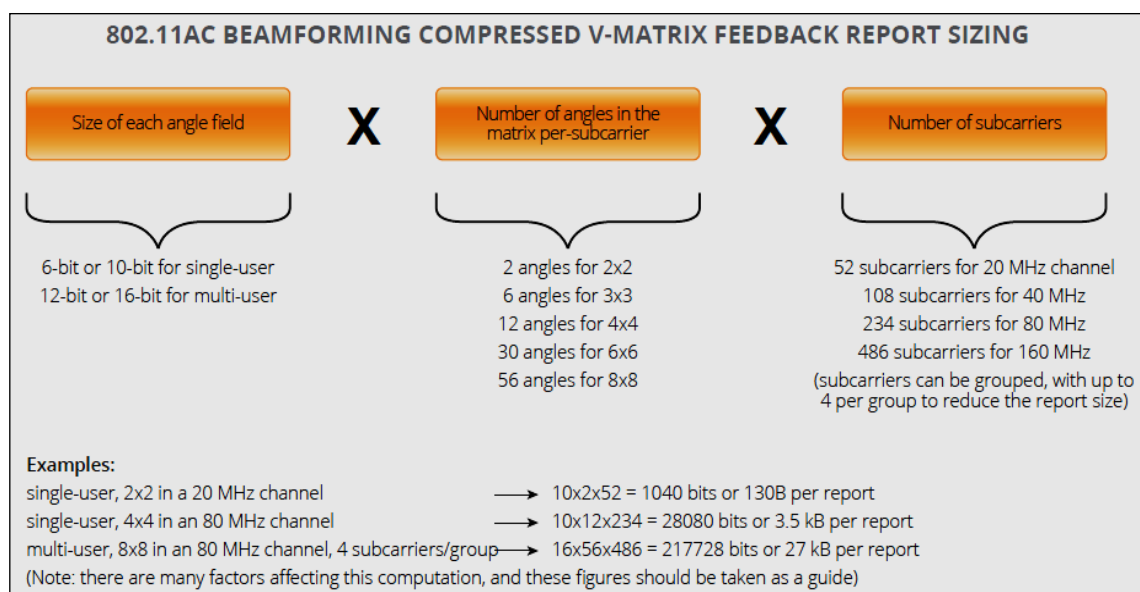
En 802.11ac, el protocolo para la generación de CSI en el transmisor se basa en tramas de datos nulos o de sondeo NDP (Null Data Packet – Paquetes de Datos Nulos), junto con tramas de anuncio y tramas de respuesta.

En primer lugar, el beamformer envía una trama NDPA (Null Data Packet Announcement – Anuncio de Paquetes de Datos Nulos) identificando los destinatarios previstos y el formato de la próxima trama de sondeo. A esto le sigue la propia NDP de



sondeo, y el beamformee responde entonces con una trama de reporte de la configuración del haz.

Las tramas NDPA y NDP son muy simples. La NDPA identifica qué estaciones deben escuchar a la trama de sondeo posterior, junto con las dimensiones de esa trama en función del número de antenas y flujos espaciales en uso. La trama que sondea en sí es sólo un paquete de datos nulos. Es el preámbulo con su LTFs.



**Figura 12 - Matriz V comprimida**

Sin embargo, el procesamiento y la construcción del informe del beamforming son complicados. El beamformee mide las características del canal de RF y devuelve las mediciones con una trama.

Los cálculos consisten en una serie de pasos. En primer lugar, se construye una matriz de las señales recibidas, con la magnitud y fase de cada combinación de antena (transmisión y recepción). A continuación, se realizan las operaciones de multiplicación de matrices sucesivas (rotaciones de Givens).

Finalmente, los parámetros (ángulos) utilizados en las operaciones de la matriz se ensamblan junto con la potencia y la fase, y se devuelve al beamformer como una matriz comprimida.

Incluso con esta compresión, un informe del beamforming puede variar de menos de 1 KB a más de 20 KB, ya que contiene información por subportadora para cada flujo de espacio-tiempo. Esto depende del número de secuencias espaciales y antenas de transmisión en uso.

La matriz V comprimida se elige para 802.11ac por varias razones:

- Es una técnica predefinida por el 802.11n, distribuye cómputo entre los receptores en lugar de colocar la carga en el transmisor.
- Es suficientemente simple para que el álgebra de matrices se pueda completar rápidamente para realimentación inmediata al beamformer.
- Proporciona una considerable compresión de datos para el informe del beamforming.
- Cuando las condiciones son favorables, el cálculo puede ser más corto para reducir aún más el tamaño de la matriz.

Su precisión está limitada por la cuantificación de los ángulos devueltos con menos bits por ángulo. En este caso, la trama de reporte se contrae, pero se pierde precisión. Los parámetros utilizados en 802.11ac representan un compromiso, permitiendo que la mayor parte de la ganancia teórica del beamforming se realice con un ahorro considerable en los cálculos y el ancho de banda de realimentación.

Así 802.11ac, al estandarizar y hacer cumplir la secuencia de resonancia y el formato de la trama de realimentación de la matriz  $V$  comprimida, permitirá la adopción generalizada del beamforming y DL MU-MIMO, además de permitir potencialmente un mejor rendimiento SDM MIMO.

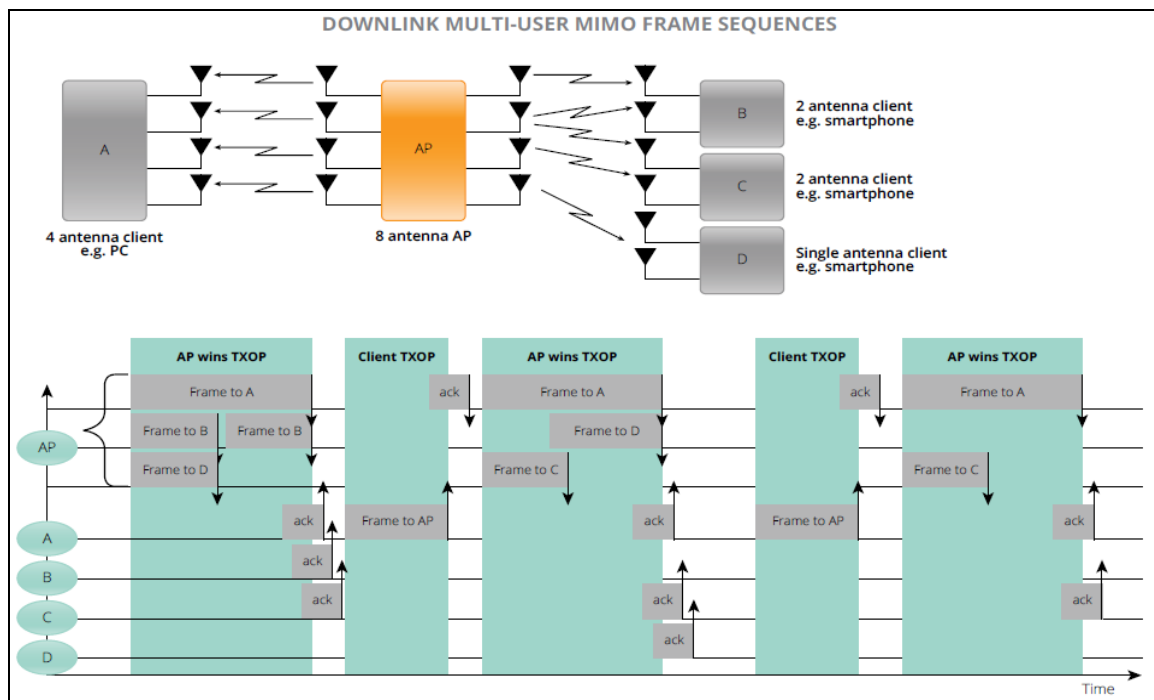
## **II.3 Mejoras de capa MAC**

### **II.3.1 MIMO multiusuario, modulación y mejoras en la MAC**

#### **II.3.1.1 MIMO multiusuario**

Algunos de los más importantes avances del rendimiento de 802.11ac provienen del MU-MIMO). Este explota el mismo fenómeno SDM utilizado en 802.11n, donde múltiples antenas envían flujos de datos separados de forma independiente, aunque las transmisiones ocupan el mismo tiempo e intervalo de frecuencia. Esta técnica MU-MIMO en 802.11ac también se conoce como SDMA (Space Division Multiple Access - Acceso Múltiple por División de Espacio).

MU-MIMO propone que, en lugar de considerar múltiples flujos espaciales entre un determinado par de dispositivos, deberíamos ser capaces de utilizar la diversidad espacial para enviar varios flujos de datos entre varios dispositivos en un instante dado. La dificultad radica en la coordinación entre los distintos dispositivos en una red ¿Cómo descubre que pares de antenas o dispositivos admiten diversos caminos, y cómo un dispositivo sabe que otro está transmitiendo para que pueda transmitir de forma segura a su compañero en el mismo instante? (Figura 13).



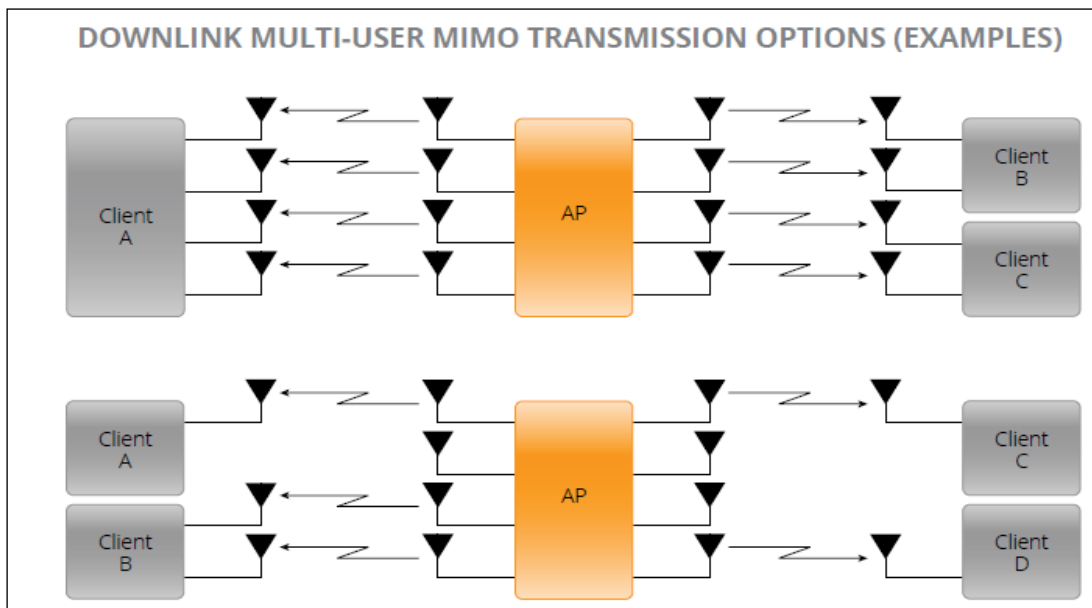
**Figura 13 - Secuencia de tramas MIMO**

802.11ac resuelve estos problemas mediante la simplificación de ellos. Se entiende que los APs son diferentes de los dispositivos clientes en que están menos limitados en espacio, potencia, e incluso el precio, por lo que son propensos a tener más antenas de transmisión que los dispositivos cliente.

Por lo tanto, dado que el número de trayectorias espacialmente diversas depende del número de antenas, y el número de posibilidades depende de la cantidad de tráfico en buffer para la transmisión, el AP puede transmitir a varios clientes de forma simultánea.

Por ejemplo, un AP de seis antenas podría transmitir simultáneamente tres flujos espaciales cada dos dispositivos cliente, siempre que las condiciones fueran favorables. Eso significa que las transmisiones a un dispositivo cliente no deberían causar interferencia excesiva en el otro (14).

La DL MU-MIMO es la única configuración admitida en 802.11ac. Se opone a algunas otras formas, tales como de enlace UL MU-MIMO (Uplink MU-MIMO). Sólo un AP o cliente pueden transmitir en cualquier instante, y mientras que el AP puede transmitir a múltiples clientes simultáneamente, los clientes sólo pueden transmitir a los AP por uno.

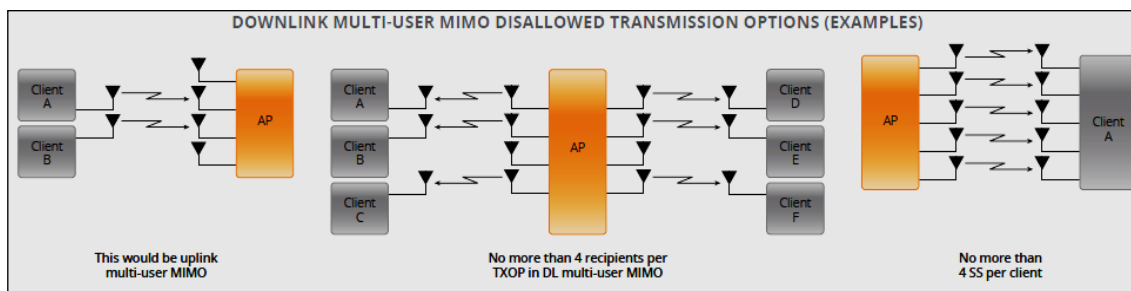


**Figura 14 - Ejemplos de transmisiones MIMO**

No hay UL MU-MIMO, en parte debido a que requiere un protocolo más complicado y porque no va a ser muy útil, ya que todo el tráfico en Wi-Fi (aparte de DLS) va hacia o desde el AP y, por lo general, esperan clientes que consumen más datos de los que generan.

En 802.11ac, DL MU-MIMO sólo funciona con retroalimentación del beamforming, donde el AP envía una trama de sondeo (paquete de datos null) y los clientes informan como escuchan la trama de sondeo en la trama retroalimentación de beamforming explícita. Mientras que MIMO de único usuario sólo se refiere a cómo un cliente recibe la señal del AP. El rendimiento MU-MIMO está limitado por la interferencia causada cuando una señal dirigida a un cliente se infiltra a otro cliente.

Para contrarrestar este efecto, el AP calcula cuánto de la señal dirigida al cliente A será recibida por el cliente B y/o el C, y utiliza técnicas de beamforming para los otros clientes para que puedan recibir con éxito sus propias señales (Figura 15).



**Figura 15 - Ejemplos de transmisiones MIMO no permitidas**

El rendimiento MU-MIMO es muy sensible a ésta auto interferencia, y la trama de la retroalimentación para beamforming MU-MIMO tiene una mayor precisión para los ángulos de la matriz, y también incluye información de la SNR para mejorar la precisión y permitir que la interferencia se reduzca al mínimo.

Así, los datos reportados permiten al AP calcular las posibilidades del SDMA para diferentes grupos de clientes, y las matrices de dirección requeridos. Este cálculo no es parte de la norma, pero es compleja y hay varios algoritmos posibles.

### II.3.2 Los algoritmos de pre codificación para el beamforming y el DL MU-MIMO

La forma más precisa de pre-codificación para MU-MIMO se conoce como DPC (Dirty Paper Coding - Codificación de Papel Sucio). DPC expone que, si el estado de interferencia del canal de RF se conoce con exactitud, hay un perfil de pre-codificación que permite la transferencia de datos a través de ese canal máximo, y no importa cuál sea el patrón de interferencia.

La analogía es tomar una hoja de papel sucio, y escribir en él de tal manera que la escritura se pueda leer. Si se conoce el patrón exacto de la suciedad, la escritura puede hacer que se destaquen en contra de ella sin que el lector necesite saber sobre el patrón. Del mismo modo, si un transmisor tiene el exacto CSI, se puede calcular el DPC y alcanzar el rendimiento máximo teórico del canal sin que el receptor conozca el CSI.

Desafortunadamente DPC es una técnica no lineal, lo que hace que sea difícil de aplicar en la práctica. Resultados similares se pueden lograr mediante la aproximación de las técnicas lineales, tales como la transmisión de probabilidad máxima y el forzado a cero.

El primero se concentra en los máximos de la señal de dirección en la antena del receptor deseado, mientras que el segundo en las direcciones nulas o ceros a los demás destinatarios de la transmisión MU-MIMO, lo que les permite decodificar las señales deseadas con un mínimo de interferencia (Figura 16).

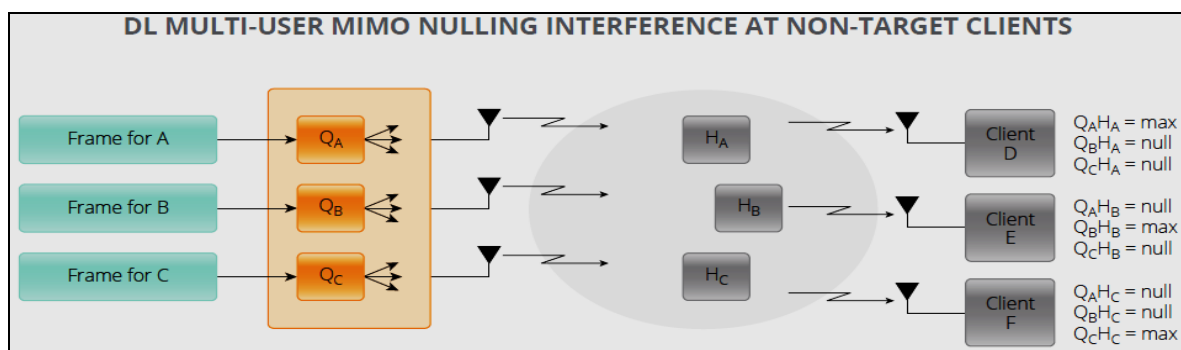


Figura 16 - Interferencias MIMO multiusuario

Para complicar aún más el algoritmo de pre codificación DL MU-MIMO, el transmisor debe elegir cuál es la medida del rendimiento a maximizar. Con un único usuario, la velocidad de datos máxima, bajo una limitación de la tasa de error dada, sería el parámetro habitual, pero con múltiples usuarios, es posible ponderar el rendimiento de cada usuario en el algoritmo.

La mayoría de los sistemas sólo suman el rendimiento de todos los usuarios con la misma ponderación. Esto puede favorecer las conexiones de alta velocidad a costa de los clientes de velocidad más baja, lo que puede ser indeseable, especialmente cuando se tiene en cuenta la QoS (Quality of Service – Calidad de Servicio).

### **II.3.3 Programación DL MU-MIMO oportunidades de transmisión múltiple**

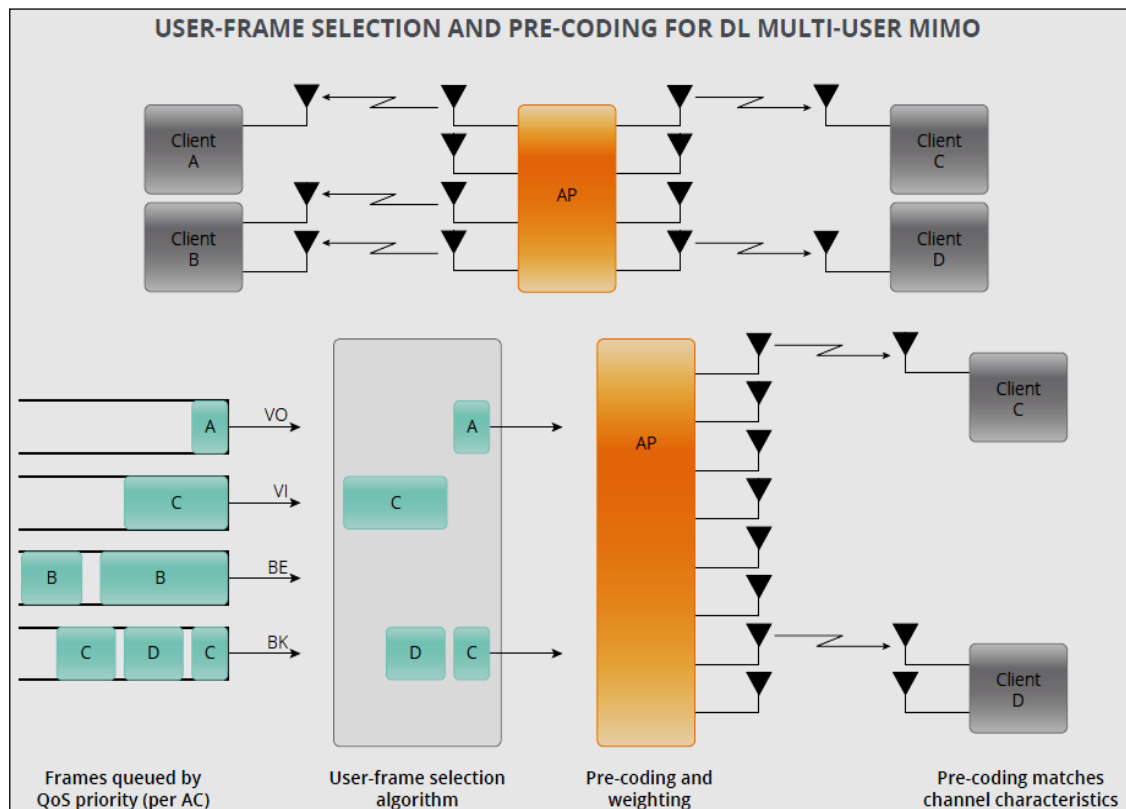
Cuando se conocen las matrices de pre-codificación y se identifican buenos grupos de usuarios múltiples, las tramas en el buffer para transmisión deben agruparse para garantizar un rendimiento óptimo. El proceso de comparación se vuelve bastante complicado, ya que las mejoras en la calidad de servicio originarias de 802.11e requieren del AP para mantener cuatro colas del búfer de transmisión, uno para cada categoría de acceso de tráfico.

802.11ac toma esto en consideración, lo que permite de forma explícita al AP (Figura 17) transmitir tráfico de menor prioridad, si se ganó una TXOP (Transmit Opportunity - Oportunidad de Transmisión) legítima para la trama primaria a transmitir. El tráfico incluido con la trama primaria puede saltarse la cola y conseguir que sea transmitida antes que las tramas de mayor prioridad, pero estas tramas no lo permiten, ya que no han podido utilizar la TXOP con la trama primaria.

Para ver un ejemplo del poder de DL MU –MIMO, planeado adecuadamente, considere un AP con ocho antenas sirviendo a un cliente con una sola antena.

Normalmente, será posible un único flujo, y mientras algunas de las antenas adicionales en el AP se pueden utilizar para mejorar la SNR (con beamforming, STBC y MRC), gran parte del potencial de las antenas adicionales del AP se desperdicia. Pero este efecto puede mitigarse por MU-MIMO. Ahora, el AP puede servir hasta ocho de estos clientes en el mismo intervalo de tiempo.

MU-MIMO y técnicas con objetivos similares, como la OFDMA - donde diferentes clientes utilizan subconjuntos de subportadoras OFDM no superpuestas - ya han sido exploradas en las redes celulares, orientadas a permitir transmisiones simultáneas desde varios clientes a la misma estación base. En 802.11ac, DL-MU-MIMO permite al AP transmitir simultáneamente a un número de clientes.



**Figura 17 - Selección de la trama-usuario y pre-codificación**

La limitación significativa de esta técnica es que el número total de flujos espaciales soportados no deben exceder el número de antenas de transmisión del AP, y la norma añade varias limitaciones adicionales: no más de cuatro clientes pueden dirigirse al mismo tiempo, ningún cliente puede utilizar más de cuatro flujos, y todos los flujos en una transmisión DL MU -MIMO deben utilizar el mismo MCS (Modulation and Coding Schemes - Esquemas de Codificación y Modulación).

## **II. 4 Cambios en la MAC**

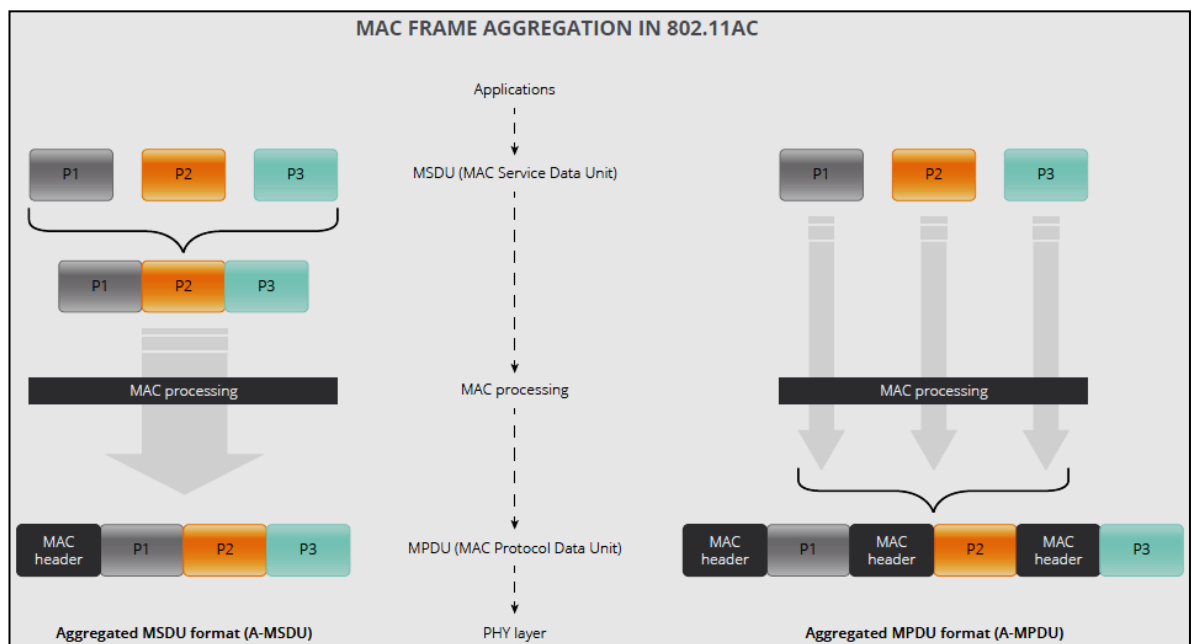
### **II.4.1 Agregación de tramas, A-MPDU, A-MSDU**

Un cliente (o AP) deben competir por el medio (una oportunidad de transmisión en el aire) con cada trama que desea transmitir. En consecuencia, se producen colisiones en el medio y retardos que podrían utilizarse para enviar tráfico. 802.11n introdujo mecanismos para agregar tramas y así reducir el número de eventos de contención.

Muchas pruebas han demostrado la eficacia de reducir los eventos de contención en los estándares 802.11 anteriores. Por ejemplo, en 802.11g, una configuración dada puede enviar 26 Mbps de datos utilizando tramas de 1500 bytes, pero cuando la longitud de trama se reduce a 256 bytes (generando 6 veces más de tramas), el rendimiento cae a 12 Mbps.

Con la agregación de la capa MAC, una estación con un número de tramas para enviar puede optar por combinarlas en una trama agregada MAC MPDU (MAC Protocol Data Unit – Unidad de Datos de Protocolo MAC). La trama resultante contiene menos sobrecarga de encabezado de lo que tendría sin agregación, se envían tramas más grandes, y se reduce el tiempo de contención en el medio inalámbrico.

Se proporcionan dos mecanismos diferentes para agregar tramas, conocidos como A-MSDU (Aggregation MSDU - Agregación MSDU) y A-MPDU (Aggregation MPDU – Agregación MPDU) (Figura 18).



**Figura 18 - Trama MAC agregada en 802.11.ac**

En el formato A-MSDU, se combinan múltiples tramas de capas superiores y se procesan por la capa MAC como una sola entidad.

Cada trama original se convierte en una subtrama dentro de la trama MAC agregada. Así, este método debe utilizarse para las tramas con el mismo origen y destino, y sólo se pueden agregar MSDUs de la misma prioridad (clase de acceso, como en 802.11e).

Un método alternativo, un formato MPDU, permite la concatenación de MPDUs en una trama MAC agregada. Cada MPDU individual se cifra y se descifra por separado, y se separa por un delimitador A-MPDU que está modificado para 802.11ac a fin de permitir tramas más largas.

A-MPDU debe utilizarse con la función bloque de acuse de recibo introducida en 802.11n. Esto permite que una sola trama ACK cubra un rango de tramas de datos recibidas. Es particularmente útil para la transmisión de video y otras transmisiones de alta velocidad, pero cuando una trama está dañada o se pierde, habrá un retraso antes



de que no se reciba un acuse de recibo y pueda llevarse a cabo una retransmisión. Esto no es a menudo un problema con la transmisión de video, donde la retransmisión a menudo no es factible, dadas las limitaciones de tiempo del medio, pero puede ser problemático para otras aplicaciones en tiempo real.

En 802.11ac, el límite A-MSDU se elevó de 7.935 a 11.426 bytes, y el máximo tamaño A-MPDU de 65.535 a 1.048.576 bytes. A corto plazo, la limitación práctica en PPDU es probable que se limite a 5.484 mseg para el tiempo en el aire. En 300 Mbps, una A-MPDU de 200 Kbytes requeriría el máximo de 5.484 ms en el aire.

Es posible combinar las técnicas de A-MSDU y A-MSPU. Estudios teóricos han mostrado que estas técnicas mejoran el rendimiento que trabajando solas. Sin embargo, las implementaciones más prácticas hasta la fecha se concentran en un DU A-MP, que funciona bien con la presencia de errores debido a su capacidad de retransmisión selectiva.

#### **II.4.2 El cifrado y la opción GCMP**

Se está introduciendo un nuevo protocolo de encriptación, conocido como GCMP (Galois/Counter Mode Protocol - Protocolo de Modo Galois/Contador) en aplicaciones 802.11 de alta velocidad. GCMP se define como una opción en 802.11ad, la enmienda de la banda de 60GHz, y esta es la base para su inclusión en el estándar 802.11 (en la próxima revisión del roll-up de 802.11) y su disponibilidad para 802.11ac.

GCMP es una buena adición a la norma, ya que tiene mejor rendimiento que CCMP (Counter Mode with Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol). Ambos protocolos son bloques de sistemas de cifrado que ofrecen confidencialidad para que los hackers no puedan descifrar los datos, autenticación para asegurarse de que proviene de los pares autenticado, integridad por lo que se puede descifrar, y protección de repetición para que los mensajes antiguos o adulterados retransmitidos por un hacker sean rechazados por el destinatario. Ambas claves usan 128 bits y generan el mismo formato de paquete y sobrecarga de 24 bytes por trama.

GCMP requiere sólo un paso para cifrar un bloque de datos determinado, y puede cifrar y descifrar los bloques en paralelo. Esto es mejor que en CCMP donde se requieren dos conjuntos de cálculos para cifrar un bloque, y cada bloque de datos en una sesión debe procesarse en secuencia. Esto significa que GCMP se adapta mejor al cifrado y al descifrado de datos de muy alta velocidad.

Ha habido especulaciones de que GCMP será necesario cuando aumenten las velocidades de los datos y las implementaciones CCMP no puedan ser capaces de seguir el ritmo. Pero no está claro si ese punto se alcanzará a los 10 Gbps (referencia 802.11-10 / 0438r2) o antes. Es posible que GCMP nunca sea requerido para 802.11, y que nunca veamos implementaciones prácticas, pero se ha establecido como una nueva opción de ser necesaria.

### II.4.3 Mejoras en el ahorro de energía

Muchos dispositivos 802.11 se siguen alimentando por batería, y aunque otros componentes de un teléfono inteligente, en particular la pantalla, aún consumen la batería mucho más que el subsistema de Wi-Fi, ahorrar energía es importante.

La nueva función se conoce como VHT TXOP Power-Save (Ahorro de Energía VHT TXOP). Le permite a un cliente apagar el transmisor después de que el AP le indica que una oportunidad de transmisión (TXOP) está destinada a otro cliente.

El AP debe asegurarse que, después de haberle permitido a un cliente apagar su transmisor en el comienzo de una TXOP, no debe transmitir una trama a ese cliente. Del mismo modo, si una TXOP se trunca por el AP, este debe recordar que ciertos clientes todavía estarán durmiendo y no les debe enviar nuevas tramas.

Para permitir identificar rápidamente a los clientes si una trama se dirige a ellos, se añade a preámbulo un nuevo campo llamado ID de asociación parcial (AID parcial) o ID de grupo para MU-MIMO. Si el campo AID parcial no es su propia dirección, el cliente puede dormir durante el resto de la TXOP.

Una de las razones para introducir el ahorro de energía TXOP VHT es que las tramas son cada vez más largas. 802.11ac ha extendido las longitudes de las tramas y ahora tiene en cuenta las tramas que se acercan a 8 Kbytes de longitud, y las tramas agregadas (A-MPDU) a 1 Mbytes.

Algo de esto se explica por el aumento de las velocidades, ya que el tiempo en el medio no se extenderá proporcionalmente. Pero las transferencias de vídeo y archivos grandes, manejan un gran número de tramas largas (posiblemente agregadas como tramas A-MS DU o A-MP DU en la capa de Wi-Fi). Puede ser que valga la pena apagar el transmisor mientras que un gran número de tramas se están entregando a otros clientes.

La otra característica de ahorro de energía importante de 802.11ac es su alta velocidad de datos. El consumo de energía en 802.11 depende en gran medida del tiempo de transmisión de datos, y cuanto mayor sea la velocidad, más corta será la ráfaga de transmisión. El tiempo empleado en recibir tramas también se reduce por las altas velocidades, pero no tan significativamente.

Otras características, como el beamforming contribuyen a velocidades mayores al aumentar la relación señal ruido en el receptor para cualquier escenario dado, por lo que también se puede decir que contribuirá a mejorar la duración de la batería.

Los avances tecnológicos del silicio en las características de miniaturización y las técnicas de ahorro de energía serán todas adoptadas en los nuevos chips para implementar la 802.11ac.

#### **II.4.4 Servicio básico extendido del factor de carga establecida**

802.11 ya define un factor de carga que permite al AP anunciar su carga actual en las respuestas de beacon y sondeo. El factor de carga incluye el número de clientes en el AP, y también una medida de la utilización del canal. Esto es útil para el equilibrio de carga iniciada por el cliente. Cuando un cliente ve un número de APs, puede optar por asociarse con uno con menos clientes o con uno con más baja utilización del canal, ya que el AP puede ofrecer un mejor rendimiento.

También ofrece una forma de control de admisión de llamadas. Si una aplicación puede indicar sus requisitos de ancho de banda al chip Wi-Fi, puede entonces evitar la asociación con APs con un ancho de banda insuficiente.

MU-MIMO introduce otra dimensión a la carga AP. No es suficiente indicar la utilización del canal, sino también la subutilización de flujos espaciales en su canal primario, así como la utilización más amplia de canales de 40, 80 y 160 MHz.

Un cliente de 802.11ac, leyendo el factor de carga extendida, puede tomar una decisión más apropiada sobre qué AP elegir para la asociación.

#### **II.4.5 La coexistencia y compatibilidad con versiones anteriores**

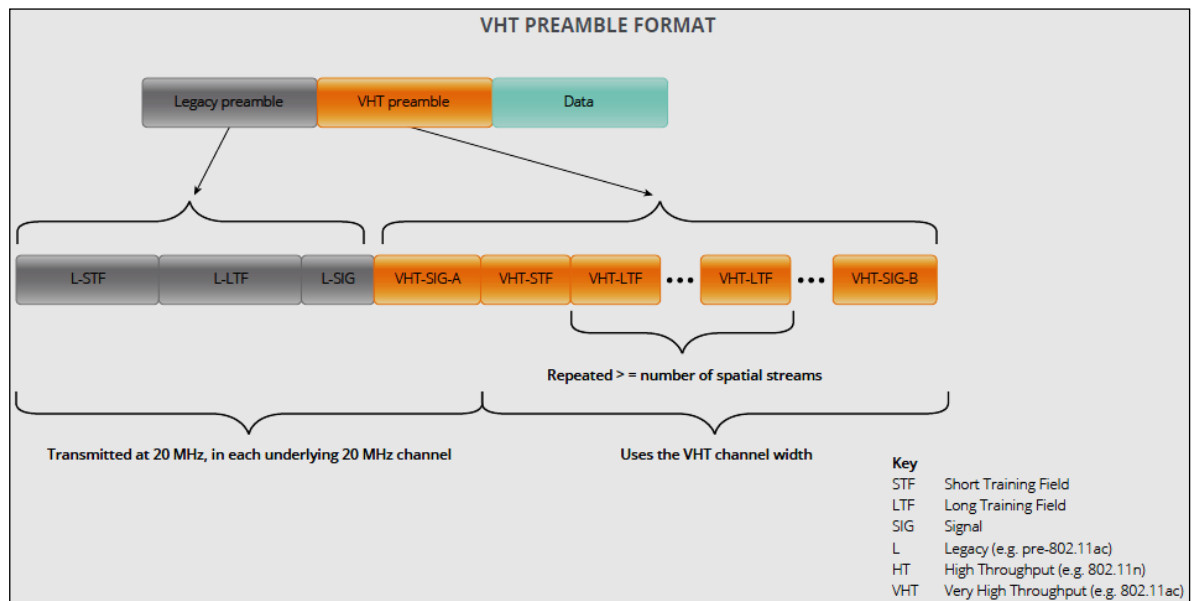
Ya que 802.11ac incluye nuevas técnicas, de mayor velocidad, sus transmisiones son por definición no decodificables por equipos 802.11 más viejos. Pero es importante que un AP 802.11ac, adyacente a APs más viejos, sea un buen vecino. 802.11ac tiene una serie de características para la coexistencia. La principal es una extensión de una técnica de 802.11n: un encabezado RF de varias partes que se utiliza en la modulación 802.11a y 802.11n. Un equipo no 802.11ac puede leer estas cabeceras e identificar que el canal estará ocupado durante un tiempo dado y, por lo tanto, puede evitar la transmisión simultánea con la trama de muy alto rendimiento.

Aunque 802.11n define un modo totalmente nuevo para la operación no compatible hacia atrás, nunca ha sido implementada en redes prácticas y se espera que todos los APs 802.11ac operen en modo mixto.

Las principales diferencias entre 802.11n y 802.11ac son los nuevos canales más amplios. Si un dispositivo 802.11ac comenzó a transmitir en 80 MHz, las estaciones 802.11 más viejas en la vecindad no serían capaces de reconocer las transmisiones o decodificarlas. La adición de un preámbulo similar a 802.11n resuelve este problema, pero la condición de que 802.11ac sólo funciona en la banda de 5 GHz, no en 2,4 GHz, hace que sea más fácil, ya que sólo 802.11a y 802.11n necesitan justificarse como heredados (no es el caso de 802.11b).

El preámbulo 802.11ac incluye una serie de campos de entrenamiento.

Se inicia con L-STF, L-LTF y L-SIG (Figura 19), el campo de entrenamiento corto heredado, el campo de entrenamiento largo heredado y el campo de señal respectivamente.



**Figura 19 - Formato del preámbulo VTH**

Para permitir un canal ancho, por ejemplo 80 MHz, que se superpone a un canal vecino de 20MHz, se necesita transmitir los campos de entrenamiento en todos los canales posibles.

Pero con OFDM, esto se puede hacer de forma simultánea en el mismo intervalo de tiempo. Entonces la trama no se vuelve muy larga. El L-STF y L-LTF permiten al receptor sincronizarse con la señal, por lo que el resto de la misma se puede decodificar correctamente.

La parte final del preámbulo heredado, el SIG, incluye información sobre la longitud de la trama. Esta es la parte que permite a las estaciones heredadas ajustar su vector de asignación de red (NAV), que forma parte del protocolo de acceso al medio existente.

A continuación, del preámbulo heredado está el preámbulo de muy alto rendimiento (VHT). Esto consiste nuevamente en secuencias STF, LTF y SIG, pero moduladas en el canal particular que utiliza el AP.

El campo VHT-SIG-A incluye el ancho de banda del canal, el número de flujos espaciales, información MCS (para MIMO de un solo usuario) y otros datos para su uso en la demodulación de la trama. Este campo se transmite como símbolos de 20MHz, replicado sobre todos los canales de 20 MHz subyacentes. El campo de STF-VHT se utiliza para que el receptor pueda normalizar las subportadoras OFDM en la transmisión posterior.

Para tener en cuenta los canales de 160 MHz no contiguos, el campo se repite en cada canal de 80MHz.

Los campos VHT-LTF están al lado, uno por cada secuencia espacial que se utilizará para la transmisión. Los campos LTF permiten al receptor calcular las características de multi-trayectoria del canal y aplicarlas al algoritmo MIMO.

Por último, un segundo VHT-SIG-B se transmite. Este incluye la longitud de la trama y más información sobre la distribución de los flujos espaciales si se va a utilizar MU - MIMO. Esta es una técnica para evitar una potencia pico alta en el transmisor mediante la rotación de la fase por sub-banda, para reducir la salida de potencia pico. La técnica ya se utiliza en los canales de 40 MHz de 802.11n.

Cuando un AP está configurado para 802.11ac y, por lo tanto, usando un canal de 80 o 160 MHz, puede actuar como un AP en canales 20 MHz utilizando el modo duplicado no HT. Esto le permite transmitir la misma trama en varios canales simultáneamente.

#### **II.4.6 Protección, ancho de banda dinámico y canalización**

Cuando una red 802.11ac a 80-MH opera en la vecindad de otro AP, se debe evitar la transmisión simultánea con una estación en la red vecina. Esto se puede lograr sin reducir permanentemente su ancho de banda de canal.

Hay tres interrogantes a tener en cuenta para resolver el problema.

- ¿Cómo puede una estación (AP o cliente) que quiere operar en 80 MHz, advertir a estaciones más antiguas que permanezcan fuera del aire mientras se está transmitiendo en el modo 802.11ac?,
- ¿Cómo la estación 802.11ac sabe que el canal completó las transmisiones de otras estaciones? y, por último,
- ¿Cómo se puede optimizar el ancho de banda útil si, por ejemplo, una estación más antigua está transmitiendo en sólo 20 MHz de los 80 MHz del canal 802.11ac?

El envío de un aviso a otras estaciones para permanecer fuera del aire se consigue mediante tramas RTS (Request To Send). La estación de 802.11ac envía múltiples tramas de protección RTS paralelo en cada 20 MHz de su canal de 80 MHz, a velocidades que un cliente 802.11a no puede procesar.

Las tramas múltiples RTS utilizan transmisión duplicada, cuadruplicada u octuplicada. Antes de enviar RTS, se realiza la evaluación CCA (Clear Channel Assessment – Evaluación de Canal Libre) para asegurarse de que no se puede oír cualquier transmisión en progreso.

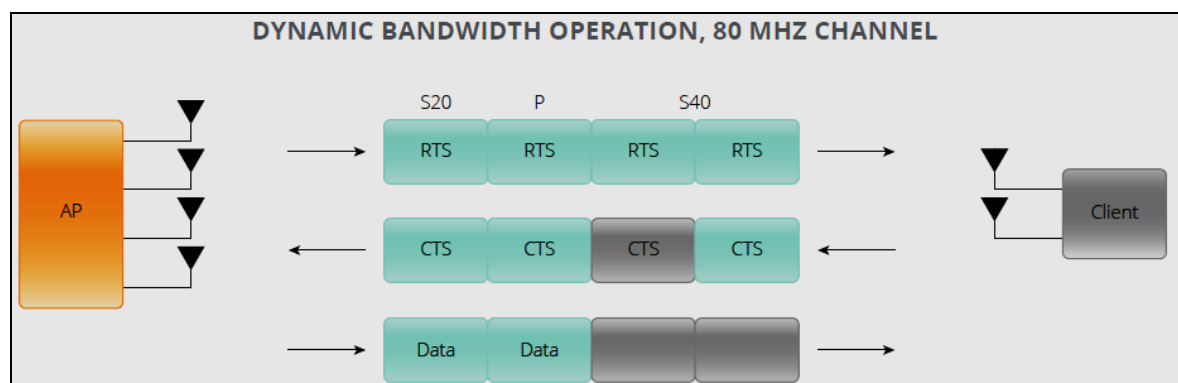
Al recibir la trama RTS, las estaciones más antiguas saben cuánto tiempo esperar por la transmisión 802.11ac. A continuación, el receptor ejecuta una evaluación CCA en cada uno de los canales de 20 MHz.

El formato de la trama RTS se amplía por lo que el emisor puede indicar sus opciones de canal y responder con una respuesta CTS (Clear TO Send) para indicar si

escucha las transmisiones en progreso desde cualquier red vecina. Si no, el emisor transmite la trama de datos usando el ancho de banda completo (80 MHz en este caso). Sin embargo, si el receptor no encuentra las transmisiones en progreso en cualquier canal secundario, puede continuar respondiendo con CTS, pero indicando que los canales primarios están libres (20 MHz o 40 MHz). Entonces el emisor puede enviar su transmisión usando sólo la parte utilizable del canal de 80 MHz.

Esto podría forzar a una reducción del canal de 80 MHz a 40, o incluso 20 MHz, pero la trama será transmitida utilizando un tiempo de aire que de otro modo se desperdiciaría. Esta función se denomina operación de ancho de banda dinámico (Figura 20).

La alternativa a la operación de ancho de banda dinámico es el funcionamiento de ancho de banda estático. Si se utiliza, el destino sólo tiene una decisión que tomar. Si el canal entero - 80 MHz en este caso - está libre, se procede con CTS, pero si cualquier parte del canal está ocupado, no responde y el emisor debe empezar de nuevo con una nueva trama RTS.



**Figura 20 - Ancho de Banda Dinámico para un canal de 80 Mhz.**

La optimización de ancho de banda dinámico está limitada por las definiciones de 802.11ac de canales primarios y secundarios. El canal primario es utilizado para transmitir algo en su ancho de banda original. Este concepto se observa en la Figura 21.

Para cada ancho de banda de canal existe un canal primario que será utilizado para transmitir tramas por ese canal siempre que esté libre. Por ejemplo, como se puede observar en la Figura 21, para poder transmitir con un ancho de banda de 40 MHz en el canal primario deben estar libres tanto el canal 60 como el 64.

Una de las razones para dividir los canales en primarios y secundarios es la de posibilitar la coexistencia de distintas redes. Debido a la variedad de dispositivos y a la cantidad de datos en curso, la mayoría de las redes no utilizan los 160 MHz. Para poder compartir los canales más anchos entre distintas redes, los dispositivos deben tener la capacidad de detectar cuando se está transmitiendo por un canal, tanto si es primario como si es secundario. Este comportamiento se observa en la Figura 22.

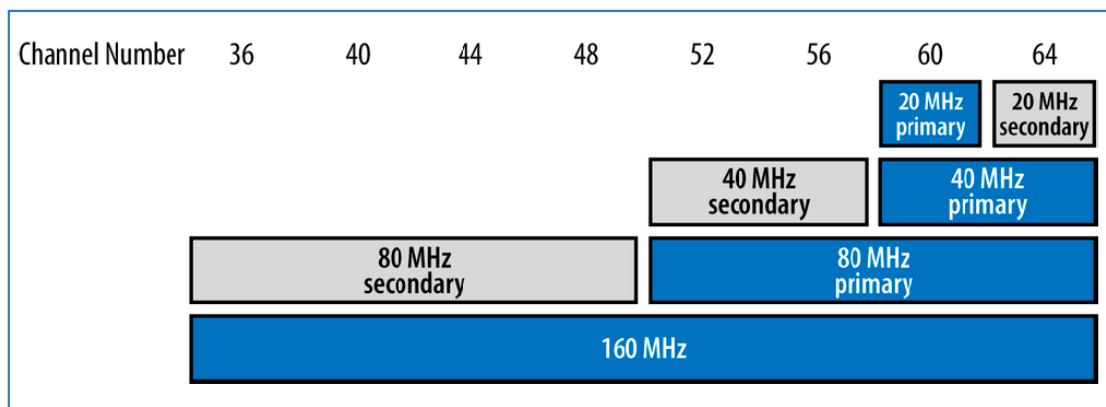


Figura 21 – Canales primarios y secundarios

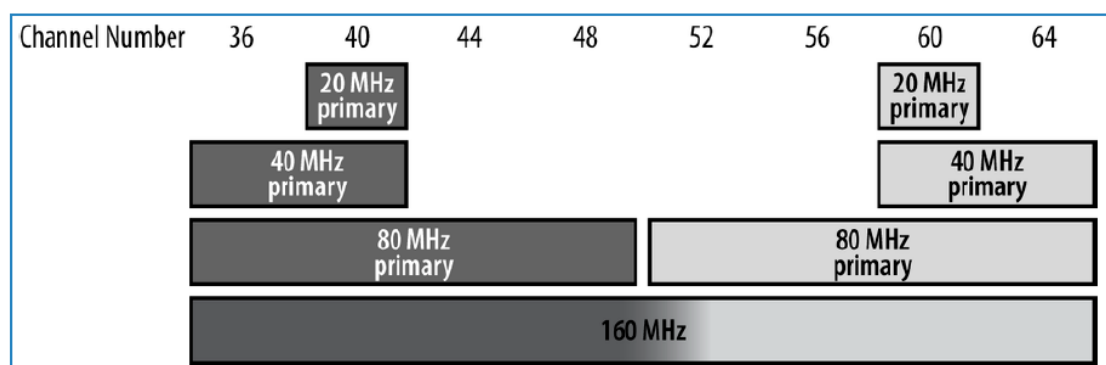


Figura 22 – Coexistencia de varias redes en una misma frecuencia

Una trama se puede enviar si el medio no está ocupado. Si el canal está ocupado, depende de cuánto ancho de banda esté utilizándose para la transmisión. Cuando se ha detectado que el canal está libre, el dispositivo puede:

- Transmitir una trama de 20 MHz en su canal primario de 20 MHz,
- Transmitir una trama de 40 MHz en su canal primario de 40 MHz (para que sea posible el canal secundario debe estar libre),
- Transmitir una trama de 80 MHz en su canal primario de 80 MHz (el canal primario y el secundario de 40 MHz deben estar libres), o
- Transmitir una trama de 160 MHz en el canal de 160 MHz (solo si el canal primario y el secundario de 80 MHz están libres).

Si algunos de los canales necesarios para iniciar la transmisión no están libres, el dispositivo debe notificarlo y comenzar el proceso de backoff para volver a intentar transmitir por el canal. El dispositivo espera a que pase un tiempo DIFS (Distributed Interframe Space – Espacio Intertrama Distribuido). Después de que este tiempo pasa, se retransmite la trama. El transmisor debe seleccionar un número aleatorio que será la posición dentro de la ventana de contención. El ganador de la retransmisión será el que haya obtenido el valor más bajo en la contienda.





## **III) IEEE 802.11ad**

### **III.1 Introducción**

Con la gran disponibilidad a nivel mundial de una amplia franja de espectro en la banda de 60 GHz para uso sin licencia, se comenzó a observar la aparición de nuevas tecnologías que permiten la comunicación Wi-Fi en esta banda de frecuencia. Sin embargo, la propagación de la señal de la banda en 60 GHz difiere significativamente de la banda 2.4 y de la banda de 5 GHz.

Efectivamente, el uso eficiente de este gran espectro requiere un replanteamiento fundamental del funcionamiento del Wi-Fi, y también, se necesita una transición del uso del medio wireless omni-direccional a direccional. La norma IEE 802.11ad reformada aborda estos desafíos, brindando multi-Gbps y nuevos escenarios para aplicarlos a los usuarios de Wi-Fi.

Estos nuevos usos incluyen la sincronización inalámbrica instantánea, el intercambio de archivos multimedia de alta velocidad entre dispositivos móviles sin una infraestructura de red fija, y el reemplazo del cable para conectar monitores inalámbricos de alta definición.

El aumento de la atenuación de la señal es la diferencia más significativa del comportamiento de la propagación de la banda de 60 GHz. En la IEE802.11ad, en un rango típico de 10 metros, comparada a la banda de 5 GHz, gracias a la ecuación de transmisión de Friis, se puede predecir una atenuación adicional de 22 dB.

Todo esto es resultado de la diferencia dependiente de la frecuencia en la apertura de la antena. Por el contrario, la absorción del oxígeno juega un rol menor en las distancias de corto alcance, en el rango de los 60 GHz. Además, la comunicación en 60 GHz se caracteriza por un comportamiento de propagación cuasi-óptico, en el cual la señal recibida está dominada por el paso LOS (Line of Sight - Línea de Visión) y las reflexiones de primer orden de los materiales fuertemente refractarios. A modo de ejemplo, se observa que las superficies metálicas son fuertes reflectores y permiten la comunicación sin línea de vista (NLOS).

Materiales concretos, por otro lado, causan gran atenuación de la señal adicional y pueden crear fácilmente un bloqueo. Por lo tanto, la comunicación de 60 GHz es más conveniente en habitaciones donde hay suficientes reflectores.

En el resto del apartado se aborda la suposición de diseño resultante de las características de propagación de onda milimétrica y la adaptación en relación con la arquitectura 802.11.

Además, se presentan las configuraciones de dispositivos más típicos, una visión general de la capa física (PHY) IEEE 802.11ad, y la arquitectura de red del conjunto de servicios básicos introducido. A esto le sigue una descripción profunda del mecanismo

beamforming 802.11ad IEEE y el diseño de control de acceso al medio híbrido (MAC), que son los elementos centrales para facilitar la comunicación direccional.

### **III.1.1 Comunicación Direccional.**

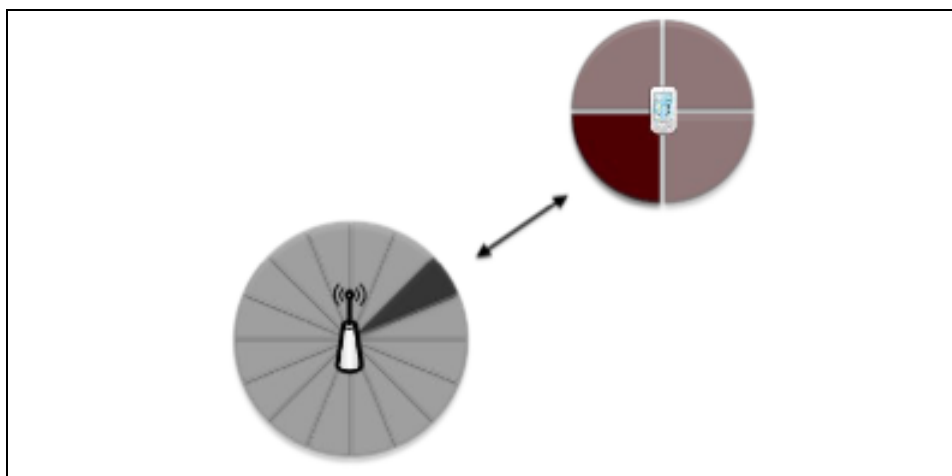
La modificación IEEE 802.11ad a la norma 802.11 define un esquema de comunicación direccional que toma ventaja de la ganancia del beamforming de la antena para hacer frente al aumento de la atenuación en la banda de 60 GHz. Con un comportamiento de propagación cuasi-óptico, de baja reflectividad y alta atenuación, los resultados del beamforming presentan un foco de señal altamente direccional.

Sobre la base de este comportamiento, la norma introduce un nuevo concepto de sectores de antena "virtuales" que ayuda al diseño de la antena Azimut. Los sectores de IEEE 802.11ad pueden implementarse usando vectores ponderados de antenas previamente computadas para un arreglo de antenas en fase o equipando un sistema con múltiples elementos de antena direccional. En ambos casos, la longitud de onda en el rango milimétrico permite factores de forma de antena significativamente más pequeños en comparación con el Wi-Fi de 2,4 / 5 GHz.

Un sector concentra la ganancia de la antena en una dirección determinada. Por lo tanto, los nodos de comunicación tienen que ponerse de acuerdo sobre el par óptimo de los sectores de recepción y transmisión, para optimizar la calidad de la señal y el rendimiento. Este proceso, que se refiere como el entrenamiento del beamforming, se aprovecha del azimut de la antena discretizado que reduce el espacio de búsqueda de las posibles configuraciones del arreglo de antenas.

Después de un primer emparejamiento de los sectores, una segunda etapa de entrenamiento de beamforming permite un mayor refinamiento de los sectores encontrados. Durante esta etapa, los vectores ponderados de las antenas que varían desde los patrones del sector predefinidos pueden evaluarse para ulteriormente optimizar las transmisiones en los arreglos de antenas en fase. Mientras, en general, se desea una mayor ganancia de la antena, impone una direccionalidad más fuerte y un mayor número de sectores de antenas angostos. Esto incrementa la sobrecarga de coordinación para adaptar la dirección de la antena entre los nodos que se comunican, y se ha demostrado que la pérdida prevista del enlace por la desalineación aumenta con la direccionalidad.

La Figura 23 muestra un ejemplo para dos nodos que se comunican a través de sectores virtuales IEEE 802.11ad. La selección destacada indica los sectores que coinciden con la línea de la dirección de vista, y que pueden ofrecer la calidad de enlace óptima en ausencia de obstáculos de bloqueo.



**Figura 23 - Sectores de antenas virtuales.**

### **III.1.2 IEEE 802.11ad clases de dispositivos y casos de uso**

La comunicación en la banda mm-Wave permite un rendimiento extremadamente alto en distancias cortas ( $< 10$  m), con alto potencial de reutilización espacial. De este modo, no sólo se adapta al uso normal de Wi-Fi, sino también amplía los usos de Wi-Fi a otras áreas de aplicación. Entre estas áreas hay transmisiones inalámbricas de vídeo de alta definición, estaciones de conexión inalámbrica, conexión a periféricos inalámbricos o alta velocidad de descarga de archivos multimedia de gran tamaño.

Para cumplir con los requisitos para estos nuevos casos de uso, el estándar IEEE 802.11ad permite una amplia variedad de dispositivos Multi-Gigabit Direccionales, desde equipos de mano restringidos en energía limitado con antenas de baja complejidad (1-4 elementos de antena) a APs con múltiples arreglos de antenas y alimentación permanente.

La Tabla 3 muestra las configuraciones típicas para algunas clases de dispositivos. Se establece el número de sectores que se correlacionan con el alcance y el rendimiento, las diferencias entre las características de tráfico especial y dirección de recepción y transmisión para cada clase. Además, se indica el número esperado de arreglos de antenas para cada clase de dispositivo. Los múltiples arreglos de antenas en fase permiten la cobertura de alta ganancia en todas las direcciones. No se utilizan en el modo MIMO, pero se los trata como un conjunto de sectores adicionales con sólo un arreglo de antenas utilizado en un momento.

Device	Antenna Sectors	Expected Range (m)	Expected Maximum Throughput (Gbps)	Traffic Type	Antenna Arrays
AP, Docking Station	32 to 64	20	7	Bursty Traffic on Downlink	$\leq 3$
Wireless Peripheral (Hard drive, Memory Stick)	$\leq 4$	0.5 to 2	4.6	Bursty	1
Wireless Display, TV	32 to 64	5 to 10	7	Continuous, RX more important	$\leq 2$
Notebook	16 to 32	5 to 10	4.6 - 7	Various, symmetric TX and RX	$\leq 2$
Tablets	2 to 16	2 to 5	4.6	Various, symmetric TX and RX	1
Smartphone, Handheld, Camcorder, Camera	$\leq 4$	0.5 to 2	1.2 - 4.6	Various, symmetric TX and RX, TX more important for video streaming devices	1

Tabla 3. Configuración típica de dispositivos.

### III.2 Suposiciones del diseño IEEE 802.11ad

La comunicación en la banda de frecuencias de onda milimétrica tiene diferentes características en comparación con las frecuencias del Wi-Fi de 2,4/5 GHz. Por lo tanto, el desarrollo de la enmienda IEEE 802.11ad siguió una serie de suposiciones de diseño que resultan de los cambios de la banda de frecuencia.

**Transmisiones altamente direccionales.** El aumento de las pérdidas de transmisión y la aplicación de técnicas de beamforming de alta ganancia conducen a un foco de señal altamente direccional. En contraste a la propagación de la señal WiFi omnidireccional, IEEE 802.11ad se comunica sobre haces angostos que siguen las características de propagación cuasi-ópticas.

**Patrones de antena cuasi-omnidireccionales.** La implementación de patrones de antena de onda milimétrica realmente omnidireccionales no es práctica, ya que el bloqueo de la señal y la desviación de los componentes del dispositivo en las proximidades de la antena tienen un efecto mucho más fuerte que las frecuencias WiFi. Por lo tanto, 802.11ad IEEE introduce patrones cuasi-omni-direccionales que permiten fluctuaciones de ganancia sobre el patrón. Se toman medidas adicionales para hacer frente a las inexactitudes resultantes.

**Ineficiente comunicación omnidireccional.** El aumento de la atenuación en la banda de onda milimétrica conduce a una reducción severa del rango de transmisión y del rendimiento cuando se utilizan los patrones de antena cuasi-omni-direccional. Sin embargo, cuando no se conoce la dirección de un interlocutor de comunicación (por ejemplo, durante la conformación de haz de formación) todavía se necesitan patrones cuasi-omnidireccional.

Por lo tanto, la ganancia de la antena direccional se incrementa por lo menos en un lado de un enlace para conseguir un intervalo de comunicación suficiente. Típicamente, las configuraciones de antena cuasi-omni-direccionales se usan en el lado del receptor. Se espera que sólo los dispositivos con restricciones extremas de espacio o energía implementen los modos de transmisión cuasi-omnidireccionales. Estos dispositivos serán muy limitados en su alcance y rendimiento (véase la Tabla 3).

**Pérdida de eficiencia extrema con los haces entrenados pobremente.** La diferencia de rendimiento entre el esquema de transmisión más alto y más bajo definido por IEEE 802.11ad, se encuentra en el intervalo de 6.5 Gbps. Un haz mal formado que usa un esquema de bajo rendimiento reduce gravemente el rendimiento del sistema y debe evitarse.

**Reducción de la huella de interferencia.** Las propiedades de transmisión altamente direccionales de los dispositivos IEEE 802.11ad reducen fuertemente la interferencia externa de la dirección del haz. Esto permite la reutilización espacial de la misma banda de frecuencia y puede aumentar significativamente el rendimiento global del sistema.

**Sordera y desventajas de comunicación direccional.** Las transmisiones IEEE 802.11ad altamente direccionales generan perturbaciones sobre los mecanismos comunes MAC de WiFi. Los patrones de transmisión direccional previenen a los dispositivos de escuchar pasivamente las transmisiones en curso, lo que lleva a colisiones adicionales durante el acceso al canal.

Además, el efecto de sordera causado por los patrones de antenas de transmisión y recepción mal alineados puede conducir a la pérdida de tramas, innecesarias a lo largo de back-off de contención y un menor rendimiento. Una discusión a fondo de estas deficiencias se puede encontrar en. IEEE 802.11ad adapta el mecanismo CSMA/AC 802.11, y además introduce una arquitectura multi-MAC, con esquemas de acceso al medio alternativos apropiados para la comunicación direccional.

### **III.3 Capa Física de IEEE 802.11ad**

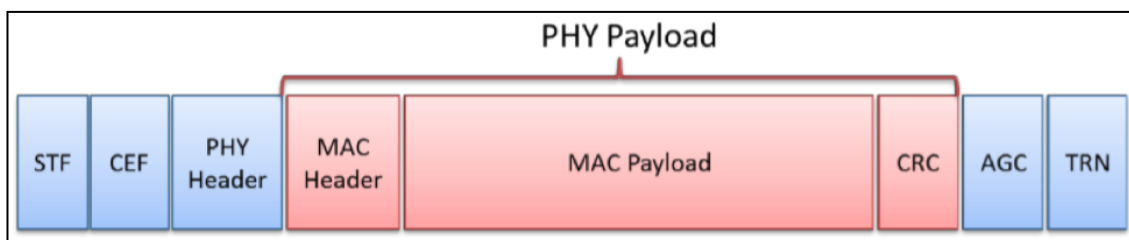
IEEE 802.11ad presenta tres capas físicas (PHY) diferentes dedicadas a distintos escenarios de aplicación. La capa física de Control se diseñó para la operación de SNR baja antes del beamforming. La capa física de portadora única (SC – Single Carrier) permite la implementación de transceptores de potencia eficiente y baja complejidad.

La opción de capa física SC de baja potencia reemplaza el codificador LDPC (Packet Data Convergence Protocol – Protocolo de Convergencia de Paquete de Datos) por un codificador Reed-Solomon para reducir aún más la potencia de procesamiento. La capa física OFDM proporciona un alto rendimiento en los canales de frecuencia selectivos, obteniendo las máximas velocidades de datos de 802.11ad.

A pesar de tener diferentes capas físicas, todas ellas comparten la misma estructura de paquetes con propiedades comunes de preámbulo. Específicamente, se usan las mismas secuencias de Golay para los campos de entrenamiento de preámbulo. Además, se usa una estructura de 3/4 LDPC de velocidad para la codificación de canal. Por otra parte, 802.11ad define un único ancho de banda de 2.16 GHz, que es 50 veces más ancho que los canales disponibles en 802.11n, y aproximadamente 14 veces más anchos que los canales definidos en 802.11ac.

La estructura de paquete único IEEE 802.11ad se muestra en la Figura 24. El paquete consta de elementos típicos de IEEE 802.11. Por ejemplo, un campo STF (Short Training Field – Campo Corto de Entrenamiento) y un campo CEF (Channel Estimation Field – Campo de Estimación de Canal) que también se utiliza para la detección automática del tipo de capa física (PHY).

A ellos le siguen la cabecera de la PHY y la carga útil PHY que está protegida por un CRC (Cyclic Redundancy Check - Comprobación de Redundancia Cíclica). Por último, podrían agregarse campos opcionales únicos para IEEE 802.11ad. Por ejemplo, el campo AGC (Automatic Gain Control – Control de Ganancia Automático) y el campo TRN (Training - Entrenamiento). Estos se usan para el mecanismo de beamforming y se describe en la Sección III.6.



**Figura 24 - Estructura de paquetes IEEE 802.11ad.**

Para proporcionar descubrimiento y detección robusta, el control de PHY tiene un STF más largo que las PHYs SC y OFDM, que comprende 48 secuencias Golay, cada una con 128 muestras de largo. Las PHYs SC y OFDM sólo utilizan 17 secuencias Golay para el STF. El campo de estimación de canal sigue el STF con 9 secuencias Golay. La PHY OFDM usa una combinación diferente de secuencias Golay en el CEF para distinguir entre OFDM y la modulación de portadora única.

La PHY de Control define un MCS. MCS implementa un Golay de 32 muestras expandiendo la secuencia junto con la codificación de velocidad 1/2 LDPC (ampliación del código de velocidad común de 3/4 LDPC) para extender el alcance y la fiabilidad a las tramas de administración, dando un rendimiento de 27.5 Mbps. La PHY de control utiliza modulación BPSK  $\pi/2$  diferencial para mejorar aún más la robustez contra la distorsión por ruido de fase.

La PHY de control obligatoria define la velocidad mínima que todos los dispositivos usan para comunicarse antes de establecer un vínculo de beamforming de alta velocidad. Se utiliza para transmitir y recibir tramas tales como beacons, solicitudes y respuestas de información, solicitud y respuesta de pruebas, barrido de sector, retroalimentación de barrido de sector y otras tramas de administración y control.

La PHY SC (MCS 1-12) y la PHY SC de baja potencia (MCS 25-31) permiten implementaciones de transceptores de baja complejidad y eficiencia energética, con un rendimiento de hasta 4.62 Gbps. La velocidad de datos SC más baja es 385 Mbps (MCS 1). Se implementa usando modulación BPSK y codificación de velocidad 1/2 con

una repetición de símbolo de dos. Todos los tipos de modulación usan rotación  $\pi/2$  para reducir la relación potencia pico-a-promedio para BPSK y para habilitar la modulación GMSK equivalente.

Para suministrar interoperabilidad entre diferentes tipos de dispositivos, MCS 1-4 son obligatorios para todos los dispositivos. Estas cuatro MCS' están basadas en la modulación BPSK-  $\pi/2$ . Las MCS 2, 3 y 4 usan velocidad de codificación  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{5}{8}$  y  $\frac{3}{4}$ , respectivamente.

La PHY OFDM (MCS 13-24) es un modo opcional para máximo rendimiento a costa de una estructura de transceptor más complejo y de energía intensiva. El tipo PHY OFDM utiliza 64-QAM y una velocidad de codificación de  $\frac{13}{16}$  para obtener las velocidades de datos 802.11ad más de hasta 6.75 Gbps.

Con el fin de mantener baja la complejidad y el consumo de energía del transceptor, los dispositivos móviles y de bajo costo son comúnmente construidos con PHY de simple portadora. Por el contrario, los dispositivos estacionarios con requerimientos de alimentación de potencia fija y alto rendimiento (APs, pantallas inalámbricas, etc.) implementan el espectro completo de los MCSs incluyendo transceptores OFDM complejos.

### **III.4 Arquitectura de red IEEE 802.11ad**

Esta sección describe los cambios a la arquitectura de red IEEE 802.11 definidos por la norma IEEE 802.11ad. En primer lugar, se describen los cambios en el BI (Beacon Interval - Intervalo Beacon). A continuación, se introduce un novedoso tipo de red llamado el PBSS (Personal Basic Service Set - Conjunto de Servicios Básico Personal), seguido de la descripción de los mecanismos de anuncios de red y de planificación.

#### **III.4.1 Intervalo Beacon (BI)**

IEEE 802.11, en las bandas de frecuencias más bajas, organiza el acceso al medio a través de intervalos beacon recurrentes periódicamente que se inician por una sola trama beacon transmitida omni-direccionalmente por el AP, o la estación de coordinación.

El beacon anuncia la existencia de una red Wi-Fi, y ulteriormente, los datos de administración. Por lo general, el resto del BI se usa para las transmisiones de datos entre las estaciones, siguiendo un esquema de acceso basado en contención. La longitud de un intervalo BI se limita a 1000 ms, pero normalmente se elige en el rango de los 100 ms. Mientras las duraciones de intervalo BI incrementan el retardo de conexión a los nodos que esperan por el beacon, un intervalo más grande reduce la transmisión de tramas de gestión y aumenta el rendimiento.

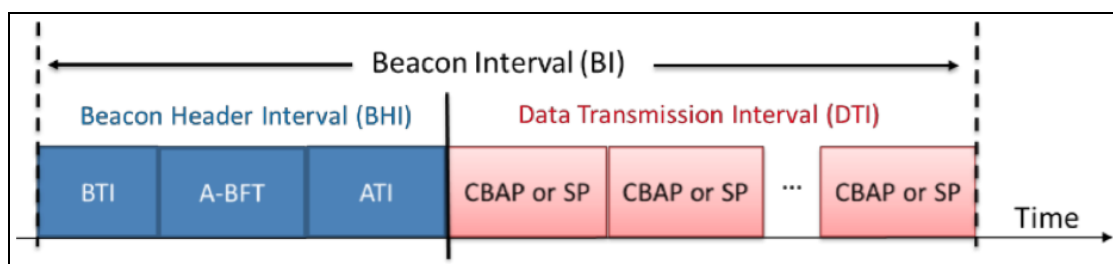
El estándar IEEE 802.11ad extiende este concepto de varias maneras para hacer frente a los desafíos de propagación de la onda milimétrica. En primer lugar, se inicia un intervalo BHI (Beacon Header Interval – Intervalo de Cabecera Beacon que sustituye

a la única trama beacon de las redes Wi-Fi existentes. El BHI facilita el intercambio de anuncios de información de administración y de red usando barrido de múltiples tramas transmitidas direccionalmente.

El mecanismo de barrido BHI supera resuelve la atenuación creciente y la dirección desconocida de los dispositivos no asociados. La funcionalidad adicional del BHI se describe más adelante. Al BHI le sigue un Intervalo DTI (Data Transmission Interval – Intervalo de Transmisión de Datos), que puede construir diferentes tipos de acceso al medio. Los parámetros de planificación y acceso al medio, que se necesitan para que las estaciones participen en una BI, se anuncian por el coordinador de red central, el PCP (PBSS Control Point - Punto de Control PBSS) o AP, durante el BHI. Esto asegura que las estaciones reciben esta información a pesar de que no esté disponible un mecanismo eficiente de difusión.

Un intervalo típico de beacon, que consiste de BHI y DTI, se muestra en la Figura 25. El BHI se compone de hasta tres sub-intervalos. En primer lugar, el Intervalo BTI (Beacon Transmission Interval – Intervalo de Transmisión Beacon) comprende múltiples tramas beacon, cada una transmitida por el PCP/AP sobre un sector diferente para cubrir todas las direcciones posibles. Este intervalo se usa para el anuncio de la red y el entrenamiento beamforming de los sectores de antena de PCP/AP.

En segundo lugar, el A-BFT (Association Beamforming Training - Entrenamiento de Formación de Haz de Asociación), se utiliza por las estaciones para formar su sector de antena para la comunicación con el PCP/AP. En tercer lugar, durante el Intervalo ATI (Announcement Transmission Interval – Intervalo de Anuncio de Transmisión), el PCP/AP intercambia información de administración con las estaciones asociadas y del haz formado (beam-trained).



**Figura 25 - Estructura de intervalo de baliza IEEE802.11ad**

Si bien la comunicación durante BTI y A-BFT usa MCS 0 para aumentar el alcance de los haces no entrenados, la comunicación durante el ATI tiene lugar con las estaciones de haz formado, y por lo tanto, es más eficiente.

El DTI se compone de uno o más períodos CBAPs (Contention-Based Access Period - Periodo de Acceso Basado en Contención) y los períodos SP (Service Period – Periodo de Servicio), donde las estaciones intercambian tramas de datos. Mientras que en CBAP las múltiples estaciones pueden competir por el canal de acuerdo con la Función



EDCF (Enhanced Distributed Coordination Function - Función de Coordinación Distribuida Mejorada) del IEEE 802.11, se asigna un SP para la comunicación entre un par dedicado de nodos como un periodo libre de contención.

### **III.4.2 Conjuntos de servicios básicos personal**

IEEE 802.11ad introduce el PBSS, donde los nodos se comunican de la misma forma que una red ad-hoc. Sin embargo, uno de los nodos que participan tiene el rol de Punto de Control del PBSS. Este PCP actúa similar a un AP, anunciando a la red y organizando el acceso al medio.

Este enfoque centralizado permite los procesos de red direccional y de anuncio de planificación, descrito en la siguiente sección, a usarse en una red ad-hoc como una red. La red PBSS se ha introducido para satisfacer las nuevas aplicaciones dirigidas por IEEE 802.11ad tales como, por ejemplo, el almacenamiento inalámbrico y el uso de los dispositivos periféricos y monitores inalámbricos. Para estas aplicaciones, por lo general, no existe infraestructura preinstalada y la comunicación tiene lugar entre un conjunto de dispositivos personales.

Una red ad-hoc, como una red con un controlador centralizado, plantea dos retos principales. En primer lugar, para los dispositivos con restricciones de energía, se aumenta el consumo de energía en el PCP penalizando a un único dispositivo, aunque siempre se desee una distribución justa de los costos de energía.

En segundo lugar, una caída del PCP paraliza todo el PBSS. Para responder a estos desafíos, se define un procedimiento de traspaso PCP (PCP Handover). Este procedimiento puede usarse para traspasos explícitos (iniciados por el PCP actual) o implícitos (después que un PCP no está disponible). Además, al seleccionar entre un conjunto de posibles PCPs, se consideran las capacidades únicas de las estaciones candidatas PCP para elegir el PCP que proporcione el número más completo de servicios a la red.

### **III.4.3 Anuncios de red y de planificación**

Los anuncios de la red de la IEEE 802.11 se propagan tradicionalmente en forma periódica, usando tramas beacons del AP. Debido a la ganancia limitada de la antena de las transmisiones cuasi-omni-direccional de onda milimétrica, el rango de cobertura se restringe severamente.

En consecuencia, el beacon se envía como una serie de tramas beacon transmitidas direccionalmente. Para tener el mayor rango posible, las tramas beacons se transmiten en el MCS más robusto (MCS0). IEEE 802.11ad también especifica señalización adicional para la planificación de la red y de formación de haz anexadas a cada trama beacon.

En conjunto, esto resulta en un aumento significativo de sobrecarga en comparación con la Wi-Fi oficial. Así, se hace crítico controlar la cantidad de

información que se transmite en cada BI. Además, las transmisiones durante el A-BFT, que también usa MCS 0, crea sobrecarga recurrente durante cada BI, cuando está presente A-BFT. El problema de sobrecarga se vuelve especialmente relevante cuando se aplican duraciones BI breves a las aplicaciones críticas en retardo como, por ejemplo, la transmisión de vídeo.

La enmienda IEEE 802.11ad define un número de estrategias de contador.

Primero, es posible dividir el barrido de beacons en varios BIs. Esto, sin embargo, aumenta el tiempo que un nodo necesita para configurar su conexión al PCP/AP, ya que no todas las direcciones son útiles para cada BI. El resultado es un aumento en la demora de asociación.

Segundo, es posible planificar periódicamente BIs sin A-BFT, lo que también resulta en una demora adicional de asociación. Tercero, IEEE 802.11ad introduce al ATI. Durante el ATI, los nodos de haz formado y asociados pueden atender datos de administración usando tramas transmitidas direccionales, direccionadas individualmente, codificadas con una MCS más eficiente.

Por lo tanto, es posible mover información desde tramas beacons espectralmente ineficientes a las tramas transmitidas durante el ATI, limitando los beacons a la información mínima necesaria.

También, para los intervalos beacons con división de barridos beacon, las estaciones que no reciben un beacon, pierden información de la red y de temporización. Sin esta información, las estaciones no pueden participar en un BI. Implementando un ATI se resuelve este problema, cuando la información de planificación y de administración se transmite individualmente a las estaciones asociadas.

### **III.5 Capa de control de acceso al medio IEEE 802.11ad**

En contraste a la Wi-Fi oficial, la IEEE 802.11ad utiliza una aproximación MAC híbrida para abordar sus diversos casos de uso. El estándar soporta acceso basado en contención, asignación de tiempo de canal planificado y asignación de tiempo de canal dinámico.

Los dos últimos esquemas corresponden a los mecanismos TDMA (Time Division Multiple Access – Acceso Múltiple por División de Tiempo) y de sondeo. El acceso basado en sondeo comparte similitudes con el modo de función PCF (Point Control Function – Función de Control Puntual) de IEEE 802.11, pero se adapta a las transmisiones direccionales y provee una flexibilidad mayor cuando se refiere a distribución de recursos entre los nodos.

El mecanismo de asignación planificada extiende el concepto de flujo de tráfico conocido de la HCF (Hybrid Coordination Function - Función de Coordinación Híbrida) de IEEE 802.11 para solicitar tiempo compartido del DTI para TDMA, como de acceso al

medio.

A continuación, se describen los tres métodos.

### **III.5.1 Acceso basado en contención al medio**

El acceso al medio en CBAPs cumple con EDCA (Enhanced Distributed Channel Access - Acceso de Canal Distribuida Mejorada) de la IEEE 802.11, incluyendo las categorías de tráfico para brindar soporte de QoS, agregación de tramas y reconocimientos de bloque.

Sin embargo, cuando se usa el acceso basado en contención con antenas direccionales, aparece el problema de sordera. Un nodo sordo no recibe información transmitida direccionalmente debido a los patrones de antena desalineados. Mientras que el proceso de entrenamiento de beam en IEEE 802.11ad previene la sordera para las transmisiones intentadas, posee un problema para la detección de la portadora durante el acceso basado en contención y puede conducir a un aumento de colisiones.

Aparece un problema adicional para el acceso basado en contención cuando un receptor típicamente no conoce de donde viene una señal. Así, se necesita el uso de patrones de haz cuasi-omni-direccionales, lo que reduce el presupuesto del enlace y el rendimiento.

El acceso al medio basado en contención de IEEE 802.11ad se adapta para el uso del medio direccional y el uso de multi-MAC. Esto incluye el soporte para los temporizados NAV (Network Allocation Vector – Vector de Asignación de Red) Múltiple (uno por cada estación), que permite iniciar una transmisión a un dispositivo par cuando el NAV para ese dispositivo es cero, a pesar de que el NAV para otro dispositivo homólogo podría ser distinto de cero.

### **III.5.2 Asignación de tiempo de canal dinámico.**

IEEE 802.11ad define un mecanismo de asignación de tiempo de canal dinámico que implementa el acceso de canal basado en sondeo. La asignación de tiempo de canal dinámica es una extensión del modo PCF IEEE 802.11. Proporciona una mayor flexibilidad en la asignación de recursos (las estaciones sondeadas solicitan tiempo de canal en lugar de sólo la transmisión de una trama) y la adaptación para la comunicación direccional.

El acceso de canal basado en sondeo aporta varias ventajas para la comunicación de onda milimétrica.

En primer lugar, debido al enfoque centralizado con un PCP/AP, las estaciones son conscientes de la dirección de las señales entrantes. Por lo tanto, se impide el problema de sordera que afecta el acceso basado en contención y pueden evitarse los patrones cuasi-omni direccionales recibidos.

En segundo lugar, la planificación centralizada en un PCP/AP también ayuda a reaccionar de manera eficiente a las ráfagas de tráfico descendente, como la planificación dinámica puede adaptarse en el curso de un BI. En contraste, la planificación pseudo-estática descrita en la siguiente sección, sólo puede anunciar parámetros de asignación modificados en el inicio de cada BI.

Cuando se aplica el mecanismo de asignación dinámica, el acceso al medio durante el DTI se organiza como sigue. El PCP/AP adquiere el medio y envía una serie de tramas de sondeo para las estaciones asociadas. Esto se responde con un bloque SPR (Service Period Requests - Solicitudes de Período de Servicio) usado por las estaciones sondeadas para solicitar tiempo de canal. El PCP/AP asigna el tiempo de canal disponible de acuerdo a estas solicitudes, anunciando cada asignación con un período de autorización por separado, consistente de tramas de Autorización individuales para las estaciones que participan en la asignación.

IEEE 802.11ad prevé la integración del mecanismo de asignación dinámica en CBAPs y SPs. Cuando se integra en un CBAP, las estaciones asociadas tratan de adquirir el medio y pueden interferir con las asignaciones dinámicas. Para evitar esto, el PCP/AP hace uso de acceso al medio priorizado la utilización del PIFS (Point Interframe Space - Espacio Intertrama Puntual) y el canal se protege por la extensión de los campos de duración de la trama. Esta extensión hace que los nodos que oyen una trama para asumir que el canal está ocupado hasta el tiempo especificado en el campo de duración. Este mecanismo se utiliza de manera que las tramas de sondeo y SPR protejan la fase de sondeo, mientras que cada asignación dinámica está protegida por sus tramas de autorización precedentes.

Para simplificar el mecanismo de planificación y reducir la complejidad de la implementación, las asignaciones dinámicas se planifican espalda con espalda, con cada asignación inmediatamente después de su período de autorización. Para alcanzar confiabilidad de los nodos que están involucrados en una asignación, las tramas direccionales individuales se transmiten durante el período de autorización. En el caso de una asignación entre PCP/AP y una estación, sólo se envía una trama de autorización a la estación no-PCP/AP.

Cuando no todo el tiempo de canal disponible se asigna dinámicamente, el PCP/AP puede repetir todo el proceso de sondeo entero. En el caso de integración en un CBAP, el tiempo de canal restante puede también utilizarse para acceso CSMA/CA.

Un ejemplo para tres estaciones sondeadas se muestra en la Figura 26. El PCP/AP comienza una fase de sondeo en el comienzo del DTI, transmitiendo una trama de sondeo para cada estación asociada, a la que se responde con una serie de tres SPRs por las estaciones.

La segunda estación solicita la comunicación con otra estación no-PCP/AP mientras que las estaciones uno y tres tienen intentan comunicarse con el AP (no mostrado). Las asignaciones resultantes se planifican espalda con espalda, cada una precedida por un

período de autorización. En el caso de la comunicación con el AP, el período de autorización consiste de una trama, en vez de dos. El tiempo hasta que las tramas precedentes protegen el canal se indica mediante líneas de separación.

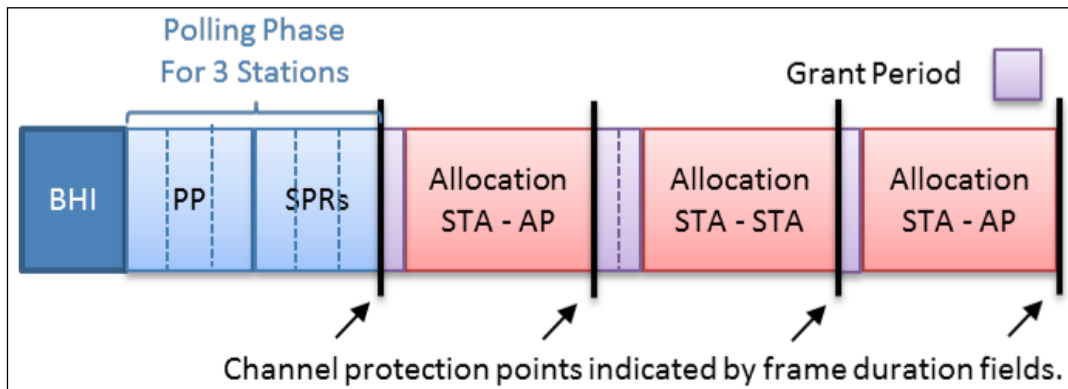


Figura 26 - Asignación dinámica de canales

### III.5.3 Asignación pseudo-estática de tiempo de canal TDMA

Durante la asignación de tiempo de canal pseudo-estática, los SPs que vuelven a ocurrir cada intervalo de beacon se dedican exclusivamente a un par de nodos de comunicación. El acceso al canal utilizando este mecanismo TDMA proporciona fiabilidad y es la mejor manera de cumplir con la demanda de QoS. Además, la planificación de SPs se propaga por el PCP/AP a todas las estaciones asociadas. Por lo tanto, cada nodo que no se está comunicando durante un SP puede entrar en el modo de suspensión, lo que permite el ahorro eficiente de energía.

Un flujo de tráfico se define como un flujo de unidades de datos de servicio MAC que se va a entregar sujeto a ciertos parámetros de QoS, caracterizados por una especificación de tráfico.

La enmienda IEEE 802.11ad define que las estaciones deben usar las especificaciones de tráfico para solicitar la planificación de las asignaciones de canal pseudo-estática en el PCP/AP. Una estación solicitante define las propiedades de su demanda de tráfico en términos de duración de la asignación, y las características del tráfico isócrono o asíncrono.

El cálculo de la duración de la asignación, requiere un enlace de haz formado (beam-trained) completo con velocidad conocida entre el origen y el destino. De lo contrario, la especificación de tráfico tiene que modificarse después de la formación de haz (beam-training) cuando se conoce la tasa de rendimiento del enlace. Un flujo de tráfico isócrono resulta en asignaciones SP pseudo-estáticas que satisfacen una tasa constante de la carga útil recurrente (ejemplo típico, para aplicaciones de dispositivos inalámbricos) con ciertas exigencias de latencia. Los flujos de tráfico asíncrono, por el contrario, no satisfacen la demanda de carga recurrente. Una aplicación de ejemplo

típico es la descarga rápida de archivos.

La planificación real, que incluye las asignaciones solicitadas, se difunde por el PCP/AP en un elemento de planificación extendida en la BTI o ATI siguiente.

### **III.6 Concepto de Beamforming de IEEE 802.11ad**

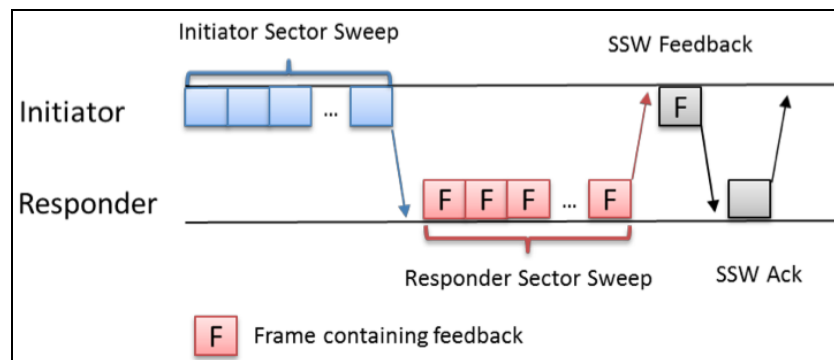
La formación o entrenamiento de beamforming determina los sectores de antena del receptor o transmisor para un par de estaciones. Esto se logra mediante la transmisión de una secuencia de tramas de entrenamiento bidireccional. A lo largo del proceso de formación, las transmisiones omnidireccionales de doble lado, se evitan en la medida que están severamente limitadas en rango.

La fase de formación de haz se divide en dos sub-fases. En primer lugar, durante el barrido SLS (Sector Level Sweep – Barrido a Nivel de Sector) se determina una configuración inicial de sector de antena de ajuste grueso. Esta información se usa posteriormente en una fase opcional BRP (Beam Refinement Phase – Fase de Refinamiento de Haz), que sintoniza los sectores seleccionados. Durante el SLS cada una de las dos estaciones, capacita a su sector de antena de transmisión o el sector de antena de recepción. Cuando los dispositivos son capaces de una ganancia de antena de transmisión razonable, la elección más común es entrenar sólo los sectores de transmisión durante el SLS y derivar la configuración de la antena de recepción durante el siguiente BRP. Los sectores de transmisión y recepción totalmente refinados en ambos lados de un enlace permiten alcanzar velocidades multi-Gbps sobre rangos de hasta 10 m.

En esta sección se explica la aproximación general de beamforming introducido en el estándar IEEE 802.11ad. El concepto de beamforming permite una cantidad significativa de implementaciones propietarias y tiene una variedad de características opcionales. Por lo tanto, nos centramos en primer lugar en la fase SLS obligatoria, seguida por una descripción de las partes obligatorias de la BRP.

#### **III.6.1 SLS- Fase de barrido a nivel de sector**

Durante los SLS, un par de estaciones intercambia una serie de tramas de barridos SSW (Sector Sweep – Barrido de Sector) (o beacons en el caso de la formación del sector de transmisión en el PCP/AP), sobre diferentes sectores de antena para encontrar el que proporciona la más alta calidad de la señal. Durante los SLS, cada estación actúa una vez como un transmisor y una vez como un receptor de un barrido tal como se muestra en la Figura 27.



**Figura 27 - Barrido sectorial de nivel.**

La estación que transmite primero se denomina el iniciador; el segundo el que responde. Ambos, el que inicia y el que responde el barrido pueden usarse de dos maneras diferentes como se muestra en la Figura 28. Durante un barrido TXSS (Transmit Sector Sweep – Barrido de Sector de Transmisión), mostrado en la parte izquierda de la Figura, las tramas se transmiten en diferentes sectores, mientras que el nodo apareado recibe con un patrón cuasi omnidireccional.



**Figura 28 - Formación del sector de transmisión y recepción.**

Para identificar el sector de transmisión más fuerte, el transmisor marca cada trama con un identificador para la antena y sector usados. Durante un barrido RXSS (Receive Sector Sweep – Barrido de Sector de Recepción) mostrada en la parte derecha de la Figura 28, la transmisión sobre el mismo sector (sector mejor conocido) permite verificar el sector de recepción óptimo en el nodo apareado.

En general, hay cuatro posibles combinaciones de barrido para un SLS: los barridos de sector de transmisión en el que inicia y el que transmite, los barridos de sector de recepción en ambas estaciones, el que inicia RXSS y el que responde TXSS, y el que inicia TXSS y el que responde RXSS.

La SNR óptima obtenida y en caso de un TXSS, el identificador de sector y antena se reportan al nodo apareado.

La retroalimentación para el iniciador se transporta en cada trama del barrido sector del que responde, lo que garantiza la recepción, aún bajo una configuración de antena óptima desconocida. La retroalimentación para el que responde se transmite con una simple trama de realimentación SSW, en la configuración de la antena óptima determinada. Por último, la trama de realimentación SSW se reconoce con un SSW-ACK por el que responde. La última trama se utiliza ulteriormente para negociar los detalles de un siguiente BRP.

En el caso de que las dos estaciones tengan suficiente ganancia de la antena de transmisión, su fase SLS puede realizarse como una formación de sector de transmisión, con la formación de sector de recepción pospuesto a un siguiente BRP. Los dispositivos con pocos elementos de antena tienen que sumar ganancia de antena en el lado del receptor en orden a obtener suficiente presupuesto de enlace para establecer el enlace. Así, estos dispositivos comúnmente incluyen un barrido de sector de recepción en su parte del SLS.

El iniciador puede solicitar al que responde hacer un barrido de sector de recepción especificando el número de sectores de recepción para entrenar durante el barrido del iniciador. Cuando el barrido del iniciador es un entrenamiento de sector de receptor, tiene que suministrar señalización adicional al SLS, como será descripto posteriormente.

### **III.6.2 BRP- Fase protocolar de refinamiento de haz**

La BRP refina los sectores que se encuentran en la fase de SLS. Estos sectores se determinan usando patrones de antena cuasi-omni-direccional no homogéneos y pueden tener una calidad de señal sub-óptima. Además, el BRP prevé optimización de vectores de antena ponderados, independiente de los patrones de sector predefinidos, para arreglos de antenas en fase.

Esto puede llevar a ganancias adicionales de rendimiento, al tiempo que se incrementa el espacio de búsqueda de la formación del haz. A pesar de que la variación libre de los vectores de antena ponderados puede resultar en patrones de antena arbitrarios, permanece la naturaleza direccional para las configuraciones de antena que producen un alto rendimiento.

Por lo tanto, el proceso de entrenamiento de los sectores direccionales predefinidos y la optimización de los vectores de antenas ponderados permanece sin cambios. Por último, la BRP se usa para entrenar configuraciones de antena de recepción en el caso de que esto no sea parte del SLS precedente. Se definen múltiples mecanismos opcionales de refinamiento de patrón para la BRP que están fuera del alcance de este documento. Nos focalizamos en las transacciones de refinamiento de haz obligatorias, un proceso iterativo en el que tanto el que inicia y el que responde puede solicitar



entrenamiento para los patrones de antena de recepción o transmisión.

Una transacción BRP evalúa un conjunto de patrones de transmisión o recepción direccionales transmitidos o recibidos contra la mejor configuración direccional conocida en el nodo apareado. Así, se evita la imperfección de los patrones cuasi-omni-direccionales.

De la misma forma que la BRP se basa en una fase SLS precedente, se garantiza un intercambio de trama confiable y pueden verificarse diferentes configuraciones de antena a través de la misma trama. Esto reduce severamente la sobrecarga de transmisiones en contraste al SLS, donde se necesita una trama completa para testear solo un sector. Para barrer las configuraciones de antena a través de una trama, se adicionan a las tramas intercambiadas campos TRN-T/R (Transmit and Receive Training Fields – Campos de Entrenamiento de Transmisión y Recepción) durante las transacciones del BRP. Cada campo se transmite o recibe con una configuración de antena que será testada por su calidad de señal. La porción restante de la trama se transmite y recibe con la mejor configuración de antena conocida.

El entrenamiento de la antena de recepción BRP se solicita especificando el número de configuraciones a verificar en el campo de cabecera de las tramas L-RX. El nodo apareado adjuntará el número acordado de campos TRN-R en la siguiente trama. Un entrenamiento de transmisión se solicita configurando el campo de cabecera TX-TRN-REQ y anexando los campos TRN-T a la misma trama BRP. Opcionalmente, se adjuntan los campos no entrenados y una trama de confirmación con la configuración del campo TX-TRN-OK se transmite por el destinatario antes que el solicitante adjunte los campos TRN-T en su siguiente trama. Igual al SLS, la retroalimentación BRP se da en forma de SNR para la mejor configuración encontrada y el mejor identificador de configuración en caso de un entrenamiento de transmisión.

La Figura 29 muestra una transacción BRP, que primero entrena la configuración del receptor entre dos estaciones, seguida por un refinamiento de entrenamiento de transmisión adicional.

Se observa que la estación B combina la solicitud para el entrenamiento de transmisión y recepción en una trama usando la variante de la solicitud explicada anteriormente. La estación A, en cambio, utiliza dos tramas para solicitar las dos direcciones de transmisión. Los campos de las tramas y de entrenamiento que pertenecen a una de las diferentes solicitudes de entrenamiento están marcados en el mismo color.

Una fase de BRP puede seguir inmediatamente al SLS, usando la trama SSW ACK para intercambiar parámetros. Alternativamente, puede iniciarse por una sub-fase de configuración BRP especial, consistente de tramas BRP libres del campo de entrenamiento. En cualquier caso, se usan los campos L-RX y TX-TRN-REQ para intercambiar los parámetros BRP.

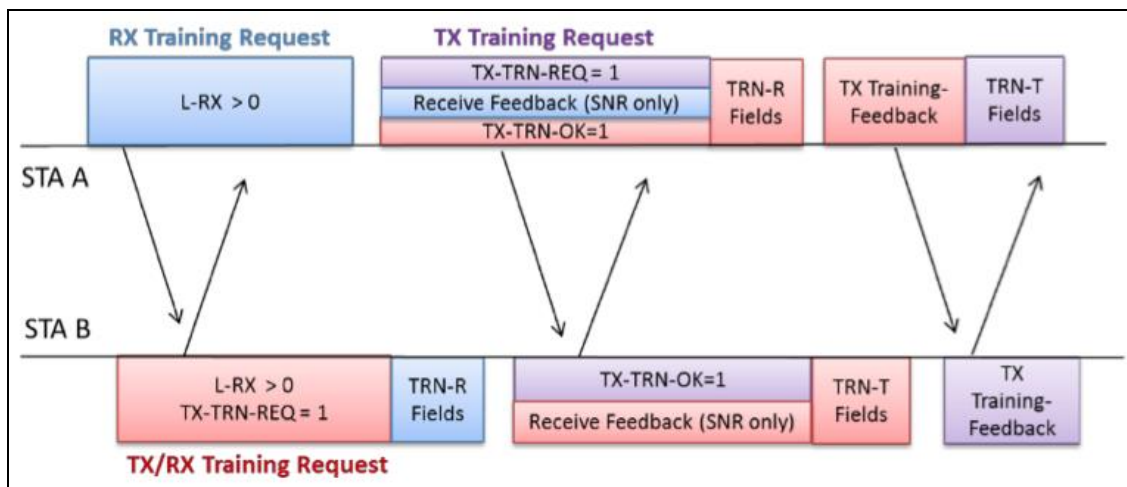


Figura 29 - Transacciones de refinamiento de haz

### III.7 Protocolo de beamforming IEEE 802.11ad

El concepto general de beamforming descrito previamente se integra en los diferentes procesos de acceso al medio y de asociación IEEE 802.11ad. Antes de la asociación, las estaciones usan una versión adaptada del proceso de beamforming para conectarse al PCP/AP sin la coordinación precedente.

Este entrenamiento se realiza ulteriormente de una forma que le permite al PCP/AP hacer un entrenamiento de sector a todas las estaciones al mismo tiempo en lugar de separadamente.

Esta sección explica el entrenamiento beamforming de asociación, seguido de una descripción de entrenamiento beam entre estaciones no-PCP/AP de acuerdo con los tres esquemas MAC diferentes.

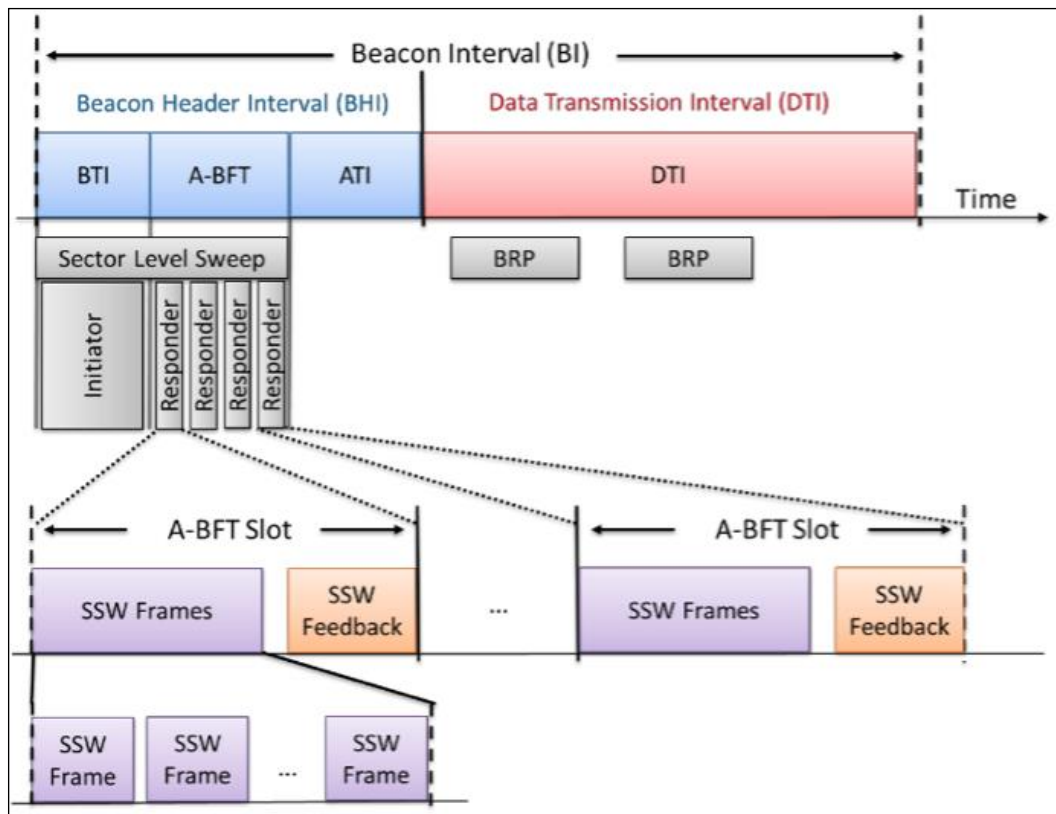
#### III.7.1 Entrenamiento beamforming de asociación

El entrenamiento beamforming entre el PCP/AP y una estación no asociada no puede basarse en la coordinación precedente a la formación de haz. Para superar los desafíos de la configuración del enlace direccional, el PCP/AP utiliza su barrido de beacon durante el BTI, como un barrido de sector de iniciador para todas las estaciones.

Con este objetivo, se suman campos de control específicos de trama SSW a la trama beacon. Para permitir que múltiples estaciones respondan a un barrido de beacon sin coordinación, el intervalo A-BFT implementa un periodo de respuesta basado en la contención. El A-BFT reserva tiempo de canal para múltiples barridos de sector del que responde (ranuras A-BFT) desde las estaciones. En la parte superior izquierda de la Figura 23, se muestra una visión general para el entrenamiento beamforming de

asociación durante el BTI y la A-BFT.

Cada ranura A-BFT consiste en una asignación de tiempo fijo para un número de tramas de SSW (transmitidas por la estación a conectar) y el PCP/AP envía una trama de realimentación SSW, como se representa en la parte inferior de la Figura 30. Las estaciones contendientes seleccionan aleatoriamente las ranuras para acceder.



**Figura 30 - Entrenamiento de beamforming de asociación**

En el proceso de contención, durante un A-BFT, no se aplica la detección de portadora. En su lugar, se detecta una colisión por una trama de realimentación SSW faltante del PCP/AP. Además, una estación podría ser capaz de finalizar su barrido debido a que sus sectores excedan el número de tramas SSW por ranura. Para manipular tales casos, pueden tomarse algunas medidas.

Primero, el PCP/AP puede responder a un barrido incompleto con una trama de realimentación SSW, forzando la selección de un sector de transmisión sub-óptimo.

En segundo lugar, una estación podría competir por ulteriores ranuras durante la A-BFT en el mismo o en un siguiente BI. Para resolver la congestión del intervalo de entrenamiento beamforming de asociación, una estación tiene que consumir una cantidad adicional de ranuras de retroceso, cuando sus reintentos superan un límite determinado.

Además, la formación de haz puede moverse en un SP dedicado por el PCP/AP, de acuerdo a los procedimientos descritos previamente. Los BRP para los enlaces entre el PCP/AP y las estaciones se planifican en el DTI, como se indica en la parte superior derecha de la Figura 30.

### **III.7.2 Formación del haz en el intervalo de transmisión de información**

La formación del beamforming durante el DTI puede inicializarse siguiendo dos diferentes métodos. Primero, el que inicia puede comenzar directamente un barrido a nivel de sector cuando gana control sobre el canal. Este método se necesita durante el acceso CSMA/CA. Segundo, el PCP/AP puede transmitir parámetros de formación de haz entre dos nodos, durante la asignación de canal dinámico o pseudo-estático. Usando el segundo mecanismo, el PCP/AP aprende acerca del entrenamiento pendiente en la formación de haz y puede integrar esa información en el proceso de planificación.

Para la inicialización del entrenamiento beam directo, una estación que tomó el canal inicia el proceso de beamforming con un barrido del sector de transmisión para el que responde.

Sin embargo, si el que inicia intenta comenzar una formación de antena de recepción, se necesita señalización adicional. En ese caso, el iniciador consulta el número de sectores de recepción en el que responde a través del PCP/AP o los protocolos de alto nivel.

Luego, para inicializar el SLS, se usa un intercambio Grant/Grant-ACK para solicitar un barrido de sector de recepción. Siguiendo esto, ambos nodos comienzan la formación después de la trama Grant-ACK. Durante el acceso basado en contención, el escaso espacio intertramas entre las tramas de beamforming asegura que ningún otro nodo gane una oportunidad de transmitir y cause interferencia.

La formación de haz vía el PCP/AP durante la asignación de canal pseudo estática se solicita con la especificación de tráfico inicial que se transmite. Los parámetros de formación de haz se incluyen en el PCP/AP en el elemento de planificación extendido que anuncia la primera asignación, la cual causa que ambos nodos de un flujo de tráfico comiencen la formación en el inicio de su primera asignación.

Para iniciar la formación de haz a través del PCP/AP durante la asignación de canal dinámica, un nodo solicita una asignación al nodo apareado de formación de haz. En su trama SPR correspondiente, el iniciador indica los parámetros para la formación prevista. Cuando se garantiza el pedido de asignación correspondiente, el PCP/AP incluye los parámetros de formación de haz en las tramas Grant enviadas a ambas estaciones involucradas en la asignación.

El refinamiento de haz durante el DTI típicamente sigue inmediatamente después de un SLS. El iniciador usa la trama SSW ACK para solicitar la formación de transmisión

o recepción como se describió previamente. Una estación que tomó el canal también puede iniciar una BRP independiente utilizando una fase de configuración BRP. Para solicitar solo transacciones de refinamiento de haz obligatorias, la fase de configuración se compone de una sola trama BRP iniciando la secuencia de refinamiento.

### **III.8 Consideraciones Finales**

Se ha presentado el estándar IEEE 802.11ad, que trae la comunicación inalámbrica de los consumidores a la banda de ondas milimétricas. Se hizo hincapié en los estándares del diseño de la capa MAC híbrida que define tres diferentes esquemas de acceso al medio, CSMA/CA, Sondeo y TDMA. Cada esquema apunta a diferentes aspectos de la comunicación de la onda milimétrica y admiten variantes de mecanismos de QoS de servicio, haciéndola apropiada para diferentes casos de uso IEEE 802.11ad.

Además, se ha abordado el protocolo de formación de haz, que permite comunicación altamente direccional. La formación beamforming de asociación y dos niveles de formación de haz son elementos fundamentales de este protocolo.

Primero, la formación de haz de asociación alinea los haces de antena entre una estación y un controlador de red central, mientras se desconoce la dirección entre los dos dispositivos.

Segundo, la formación de dos niveles reduce el espacio de búsqueda de formación de haz utilizando su etapa de formación de sintonía fina primaria que se basa en los sectores de antenas virtuales predeterminados. Su segunda etapa perfecciona aún más la configuración de antena, variando los sectores predefinidos, y también, ocupándose de los desafíos de patrones de antena omni-direccionales imperfectos. Con las configuraciones de antena de transmisión y recepción totalmente entrenadas, IEEE 802.11ad alcanza su máximo rendimiento de hasta 7 Gbps.

Además, el protocolo de beamforming soporta un procedimiento de formación para dispositivos de baja ganancia de antena y puede transmitir parámetros de formación a un coordinador central de red para la planificación de acceso al canal.

La combinación de la capa de MAC híbrida y el novedoso protocolo de formación de haz es clave para satisfacer los nuevos casos de uso IEEE 802.11ad y para hacer frente a un dispositivo específico y a las características milimétricas de onda.



## IV) Conclusiones

Las especificaciones de los estándares IEEE 802.11ac y IEEE 802.11ad prometen incrementar la capacidad, velocidad y prestaciones de diferente forma, facilitándole a los usuarios el uso de sus aplicaciones de muy alta velocidad.

Originalmente, el equipamiento basado en los estándares WLAN IEEE 802.11 (primero IEEE 802.11a y b, y 802.11g en 2003) se usó como un medio de conectividad para browsing web y correos electrónicos en aeropuertos, hoteles, cafés de Internet, hipermercados, etc. Desde entonces, tal equipamiento se ha desplazado firmemente a los ambientes hogareños y a las oficinas comerciales. Múltiples dispositivos operan ahora conectados a otros: computadoras, smartphones, tabletas, impresoras, consolas de juego, servidores multimediales, scanners y otros. Además, se quiere acceder a todo nuestro material almacenado, desde dispositivos tan pequeños como un Smartphone o tan grandes como la pantalla en un auditorio, para compartirlo con amigos y colegas de manera instantánea. También se demanda velocidades que se equiparen con la conexión Gigabits de las LANs cableadas, pero sin usar cable (Figura 31).

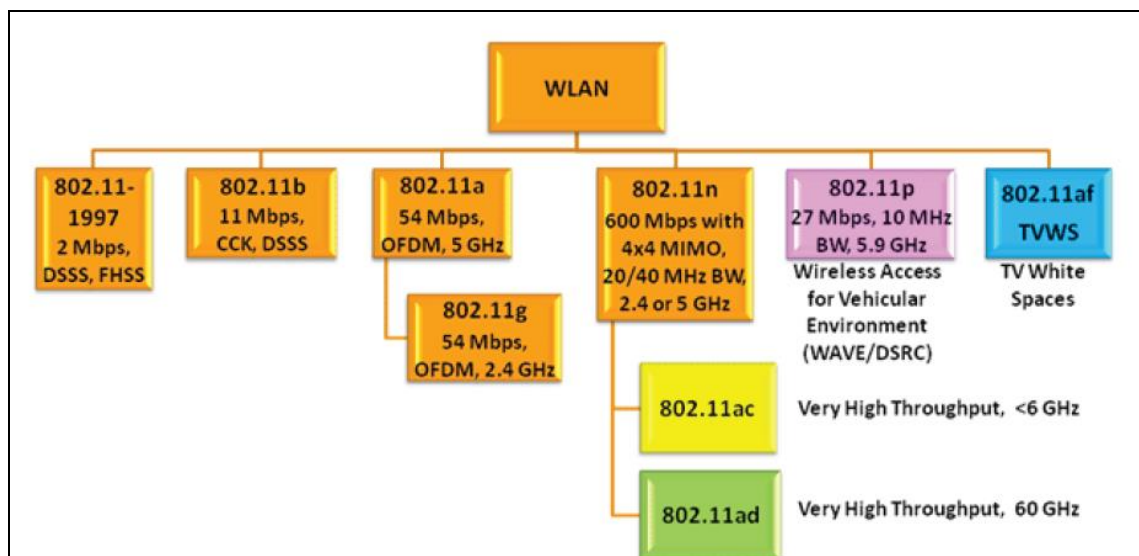


Figura 31 - Estándares IEEE 802.11

En 2009 se introdujo IEEE 802.11n, mejorando la velocidad de datos máxima de canal único desde los 54 Mbps del estándar IEEE 802.11g a más que 100 Mbps. También introdujo las comunicaciones MIMO o de streaming espacial. Hasta cuatro antenas físicas de transmisión y recepción transportan datos independientes, que es agregado en el proceso de modulación/demodulación.

Las proyecciones crecientes de aplicaciones hogareñas y de oficina están dirigidas a requerimientos de muy alto rendimiento. Para la satisfacción de esta demanda se crearon dos nuevos proyectos IEEE con el objetivo de suministrar VHT (Very High Throughput).

El grupo de trabajo TGac especificó IEEE 802.11ac como una extensión de IEEE 802.11n, suministrando un mínimo de 500 Mbps en un único enlace y 1 Gbps total en la banda de 5 GHz. Mientras que el grupo de trabajo TGad y la Alianza Wireless Gigabit (WiGig) se unieron para proponer IEEE 802.11ad, que tiene velocidades de hasta 7 Gbps en aproximadamente 2 GHz de espectro en 60 GHz. Fue oficialmente aceptado como un estándar a finales de 2012.

Con el gran número de dispositivos clientes existentes, es vital la compatibilidad hacia atrás con los estándares actuales usando el mismo rango de frecuencia. El objetivo para todos los estándares IEEE 802.11 es ser compatible a nivel de la capa MAC o la capa de enlace de datos. Ellos sólo difieren en las características de la capa Física. Los dispositivos, entonces, pueden tener hasta tres radios: 2.4 GHz para uso general (que puede sufrir interferencias), 5 GHz para aplicaciones más robustas y de más alta velocidad, y 60 GHz para operación de ultra alta velocidad, dentro de un ambiente.

La capa física IEEE 802.11ac es una extensión de 802.11n y, por lo tanto, mantiene la compatibilidad de los estándares existentes. La velocidad de datos total máxima teórica para 802.11n es 600 Mbps usando un ancho de banda de 40 MHz con 4 streams espaciales (sin embargo, la mayoría de los dispositivos están limitados a 2 streams). La velocidad de datos total máxima teórica para 802.11ac es 6.93 Gbps usando un ancho de banda de 160 MHz, 8 streams espaciales, esquema de modulación y codificación 9 (MCS9) con modulación de amplitud en cuadratura de 256 estados (256 QAM), y un pequeño intervalo de guarda. Una velocidad de datos máxima práctica para dispositivos de clientes podría ser de 1.56 Gbps, que requeriría un canal de 80 MHz con 4 streams espaciales, MCS9, y un intervalo de guarda normal.

Los modos de 160 MHz y 80+80 MHz se incluye como características opcionales en el estándar IEEE 802.11ac. Sin embargo, los primeros productos 802.11ac usaron el ancho de banda de 80 MHz y hasta 4 antenas. Los principales desafíos son la generación y análisis de modos de anchos de bandas más altos y la división de ancho de banda, y la complejidad de los tests funcionales MIMO 8x8.

Mientras que IEEE 802.11ac es una extensión de la especificación 802.11n existente, IEEE 802.11ad representa completamente un nuevo paradigma. Hoy en día, las bandas wireless de 2.4 GHz y 5 GHz para los estándares tempranas están muy congestionadas. En ellas también se da la ausencia de la capacidad para entregar velocidades de datos extremos requeridas para las aplicaciones de negocios y de consumidores existentes. Las velocidades de datos multiGigabit requeridas para las transmisiones multimedia de alta definición comprimido, incluyendo el cine digital de 4k y 8k (3840x2160 y



7680x4320 pixels, respectivamente), y el streaming de video tridimensional (3D) deben acomodarse de una manera diferente.

Una capacidad de datos extrema necesita una gran asignación de espectro. La simplicidad de fabricación de alto volumen demanda que este ancho de banda de modulación deba ser un pequeño porcentaje de la frecuencia de transmisión. La banda no licenciada global ya existe alrededor de los 60 GHz (donde los anchos de banda de modulación multi-GigaHertz se vuelven prácticos) satisface este requerimiento.

Debido a que la transmisión de 60 GHz sufre de gran atenuación cuando se propaga a través de barreras físicas, el modo de uso es diferente a los otros estándares IEEE 802.11. Las transmisiones de baja potencia no se propagarán demasiado lejos. Esto se considera una ventaja, cuando reduce la interferencia co-canal e incrementa la densidad potencial para el reúso de frecuencias.

Las asignaciones de frecuencia no licenciada alrededor de 60 GHz en cada región no coinciden exactamente. Pero hay solapamiento sustancial. Al menos 3.5 GHz de espectro continuo está disponible en todas las regiones que han asignado espectro.

La canalización recomendada por la ITU-R comprende 4 canales que tiene un ancho de 22.16 GHz cada uno. Ellos están centrados en 58.32, 60.48, 62.64 y 64.80 GHz. No todos los canales están disponibles en todos los países. El canal 2, que está disponible globalmente, es por lo tanto el canal por defecto para el equipamiento operando en esta banda de frecuencia. En noviembre de 2011, esta canalización y la máscara de espectro correspondiente para la ocupación de señal fueron aprobado por la ITU-R WP 5A para estandarización global.

Hoy en día, los dispositivos y subsistemas en la banda de 60 GHz para la tecnología es una realidad comercial, gracias a los componentes de bajo costo y micro geometría. Las configuraciones con múltiples antenas usan “beamsteering” como una característica opcional de las especificaciones. Las antenas pueden emplearse para circunnavegar obstáculos menores, tales como personas en movimiento en una habitación o una pieza que bloquea la transmisión de línea de vista. Las distancias de espacio libre más grandes (alrededor de 10 metros) y las obstrucciones más sustanciales (por ejemplo, paredes, puertas, etc.) evitarán la transmisión.

Sin embargo, hay un desafío mayor cuando es necesario testear el sistema. El diseño de componentes y de los sistemas en 60 GHz es una ciencia bien entendida y establecida, pero su aplicación para los dispositivos de alto volumen y bajo costo para el mercado de los clientes es nueva. Las herramientas para el diseño y simulación de ondas milimétricas, de análisis de redes, análisis de señal y mediciones de potencia han estado disponibles por años en aplicaciones como las comunicaciones de radar de corto alcance y militares.

El estándar IEEE 802.11ad consume mucho más ancho de banda de modulación que otros sistemas de comunicaciones inalámbricas. Además, la construcción física de los dispositivos es única.

En resumen, los estándares IEEE 802.11ac y 802.11ad proveen rendimientos de datos mucho más altos que sus predecesores. Aunque tienen usos potenciales muy diferentes. IEEE 802.11ac es una evolución de la capacidad WLAN previa. Este estándar da a la oficina no cableada la capacidad para competir directamente con los sistemas cableados Gigabit, mientras ofrece más flexibilidad de layout y conexión. En contraste, IEEE 802.11ad es una nueva solución que suministra conectividad ad-hoc de corto alcance para soportar velocidades de datos extremadamente altas.

## V) Referencias

- [1] Garber, L., "Wi-Fi razas hacia un futuro más rápido," PC marzo de 2012.
- [2] Alsabbagh, E.; Yu, H.; y Gallagher, K., "Diseño 802.11ac La consideración para dispositivos móviles," Diario de microondas, febrero de 2013.
- [3] Cordeiro, C.; Akhmetov, D.; y Park, M., "802.11ad IEEE: Introducción y Evaluación del Desempeño de la Primera Multi- Gbps tecnología WiFi," Proceedings of the ACM 2010 Taller Internacional sobre Comunicaciones ondas milimétricas: De Circuitos a las redes, 2010.
- [4] Perahia, E., et al, "IEEE 802.11ad: La definición de la próxima generación Multi-Gbps Wi-Fi," Actas, 7 de los Consumidores IEEE Comunicaciones y Networking Conference 2010.
- [5] Halperin, D., et al., "802.11 con antenas múltiples para Maniqués," Computer examen de la comunicación, enero de 2010.
- [6] Danielyan, E., "IEEE 802.11," Internet Protocol Journal, Volumen 5, N ° 1, marzo de 2002.
- [7] Sridhar, T., "Wi-Fi, Bluetooth y WiMAX y Tecnología Implementación," Internet Protocol Journal, Volumen 11, No.4, diciembre de 2008.
- [8] P. Smulders, "Exploiting the 60 GHz Band for Local Wireless Multimedia Access: Prospects and Future Directions", IEEE Communications Magazine, 40(1):140-147, January 2002.
- [9] H. Xu, V. Kukshya and T. Rappaport, "Spatial and Temporal Characteristics of 60-GHz Indoor Channels", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 20(3):620-630, April, 2002.
- [10] IEEE 802.11 working group, "IEEE 802.11ad, Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band," December 2012.
- [11] Valdes-Garcia et. al, "Single-Element and Phased-Array Transceiver Chipsets for 60-GHz Gb/s Communications", IEEE Communications Magazine 49(4):120-131, April 2010.
- [12] H. Yang, P. Smulders and M. Herben, "Frequency Selectivity of 60-GHz LOS and NLOS Indoor Radio Channel", in Proceedings of IEEE VTC, May 2006.
- [13] Choudhury and N.H. Vaidya, "Deafness: A MAC Problem in Ad Hoc Networks when using Directional Antennas", In Proceedings of ICNP, October, 2004
- [14] C. Cordeiro, "Evaluation of Medium Access Technologies for Next Generation Millimeter-Wave WLAN and WPAN", in Proceedings of IEEE ICC Workshops, June, 2009.
- [15] IEEE 802.11 working group, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", March 2012.
- [16] José María Hernando-Rábanos. Transmisión por radio, 7ª ed, Ed. Ramón Areces, 2013.
- [17] Matthew S. Gast. 802.11ac: A Survival Guide, Ed. O'Reilly Media, Inc., 2013.
- [18] Apuntes de la asignatura Sistemas Emergentes de Comunicaciones impartida por María José Madero ahora en 2013.

- [19] Ekahau. Ekahau Wi-Fi RTLS, Active RFID Tracking Solutions, and Wi-Fi Site Survey, WLAN Planning Tools: <http://www.ekahau.com/>.
- [20] ITU. UIT: Comprometida para conectar el mundo: <http://www.itu.int/es/Pages/default.aspx>